

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2019

Bc. et Bc. Pavel Hořák



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**MODELOVÁNÍ ZVUKOVÉHO POLE V UZAVŘENÉM  
PROSTORU NA NÍZKÝCH KMITOČTECH**

MODELING SOUND FIELD IN CLOSED SPACE AT LOW FREQUENCIES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. et Bc. Pavel Hořák**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.**

**BRNO 2019**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. et Bc. Pavel Hořák

**ID:** 152600

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### Modelování zvukového pole v uzavřeném prostoru na nízkých kmitočtech

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte metody fyzikálního modelování zvukového pole v prostoru z odrazy na nízkých kmitočtech, tj. pod kritickým kmitočtem daného prostoru. Zaměřte se zejména na metodu konečných diferencí v časové oblasti (FDTD), ale popište i další metody a jejich případné výhody oproti metodě FDTD. Vytvořte toolbox pro Matlab pro modelování zvukového pole pomocí zvolené metody, případně použijte toolbox již hotový s licencí umožňující volné použití pro nekomerční účely. Dále prostudujte a popište metody korekce vlastních kmitočtů prostoru. Pro vybranou metodu proveďte simulaci v prostředí Matlab s využitím výše zmíněného toolboxu. Pokud to bude možné, ověřte simulaci měřením v reálné instalaci.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Škvor, Z., Akustika a elektroakustika. Academia, Praha, 2001. ISBN 80-200-0461-0

[2] McCARTHY, Bob. Sound Systems: Design and Optimization, 2nd Edition. Focal Press; 2009, ISBN: 978-0240521565

**Termín zadání:** 1.2.2019

**Termín odevzdání:** 16.5.2019

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

**Konzultant:**

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o problematice šíření zvukových vln a simulaci těchto jevů na nízkých kmitočtech. V práci je k vyhodnocení použita metoda FDTD. Praktické měření a simulace jsou zaměřeny na systémy pro živou reprodukci hudby a jsou provedeny dle pravidel pro optimalizaci zvukových systémů. Výstupem práce je ověření principů nízkofrekvenční akustiky simulací a praktickým měřením.

## KLÍČOVÁ SLOVA

FDTD, sound system design, optimalizace zvukových systémů, módy prostoru, vlnová akustika, gradientní zdroje zvuku.

## ABSTRACT

This diploma thesis deals with issues of low frequency acoustics and simulation. In this work the FTDT method of simulation is used. Measuring and simulation are focused on live-sound system and are evaluated using basic sound system optimisation techniques. Main output of this work is verification of basic low-frequency acoustics principles using simulation and measuring.

## KEYWORDS

FDTD, sound system design, optimization of sound systems, room modes, wave acoustics, gradient sound sources.

HORÁK, Pavel. *Modelování zvukového pole v uzavřeném prostoru na nízkých kmitočtech*. Brno, Rok, 71 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: doc. Ing Jiří Schimmel, Ph.D.



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Modelování zvukového pole v uzavřeném prostoru na nízkých kmitočtech “ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za jeho oporu a konzultaci práce a mimojiné za půjčení vybavení pro akustické měření. Taktéž bych rád poděkoval svým rodičům za podporu při studiu a mé přítelkyni za podporu při vypracování práce.

Brno .....

.....

podpis autora

# Obsah

Úvod	12
<b>1 Základy prostorové akustiky</b>	<b>14</b>
1.1 Vlnová rovnice	14
1.1.1 Pohybová rovnice	14
1.1.2 Stavová rovnice plynu	14
1.1.3 Rovnice kontinuity	15
1.2 Odraz, absorpce a impedance	15
1.2.1 Odrazivý faktor	15
1.2.2 Akustická impedance	16
1.3 Metody fyzikálního modelování zvukového pole v prostoru	16
1.3.1 Geometrické metody	17
1.4 Vlnové metody	18
1.4.1 Finite-difference time-domain (FDTD) metoda	18
1.4.2 Finite element metoda (FEM)	19
1.4.3 (Boundary element method (BEM)	19
1.4.4 Transmission line method (TLM)	19
<b>2 Zdroj zvuku</b>	<b>20</b>
2.1 Rovinná vlna	20
2.2 Sférická vlna	21
2.3 Reálné zdroje	22
2.4 Subwooferové arraye	22
2.4.1 Coupled line source array	23
2.4.2 Coupled point source array	24
2.5 Kardioidní subwooferové arraye	25
2.5.1 End-fire	25
2.5.2 Gradient (in-line)	26
2.5.3 Gradient (inverted stack)	27
<b>3 Zvukové vlnění v uzavřeném prostoru</b>	<b>28</b>
3.1 Módy v pravoúhlé místnosti	28
3.2 Rezonance	29
3.2.1 Rezonance v trubici	29
3.3 Metody korekce vlastních kmitočtů prostoru	30
3.3.1 Pasivní korekce - absorpce	30
3.3.2 Aktivní absorbéry	32

3.3.3	Aktivní systémy kontroly . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Modelování zvukového pole v prostředí Matlab</b>	<b>35</b>
4.1	k-wave FDTD toolbox . . . . .	35
4.1.1	PML - perfectly matched layer . . . . .	35
4.1.2	Definování vstupů . . . . .	35
4.2	Implementace funkcí na simulaci zvukového pole na nízkých kmitočtech	36
4.2.1	Definování média . . . . .	36
4.2.2	Definice zdrojů zvuku . . . . .	37
4.2.3	Další funkce . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Kvantifikace vlivu vyzařování</b>	<b>40</b>
5.1	Kvantifikace tonální konzistence . . . . .	40
5.1.1	Spatial variance . . . . .	40
5.1.2	Magnitude deviation . . . . .	40
5.1.3	Publikum vs. FOH pozice . . . . .	41
5.2	Výkonová kvantifikace a efektivita . . . . .	41
5.2.1	HR . . . . .	42
5.2.2	Array performace rating . . . . .	42
5.3	Kvantifikace vyzařování pomocí FAR a AR . . . . .	43
<b>6</b>	<b>Optimalizace módů prostoru</b>	<b>44</b>
6.1	Pozice zdroje zvuku . . . . .	44
6.2	Excitace stěn a směrové vyzařování zdrojů . . . . .	45
<b>7</b>	<b>Predikce a reálné měření</b>	<b>47</b>
7.1	Gradientní řada zdrojů . . . . .	47
7.1.1	FDTD simulace . . . . .	48
7.1.2	Reálné měření . . . . .	52
7.2	Kardiodní řada zdrojů . . . . .	55
7.2.1	FDTD simulace . . . . .	55
7.2.2	Reálné měření . . . . .	59
<b>8</b>	<b>Diskuze nad výsledky práce</b>	<b>61</b>
8.1	Přehled MD jednotlivých konfigurací . . . . .	61
8.2	Přehled SV jednotlivých konfigurací . . . . .	61
8.3	Shrnutí výsledků . . . . .	63
8.4	Další práce . . . . .	63
<b>9</b>	<b>Závěr</b>	<b>64</b>

<b>Literatura</b>	<b>65</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>68</b>
<b>A Reálné měření</b>	<b>69</b>
A.1 Konfigurace subwooferů . . . . .	69
A.1.1 Gradientní arraye . . . . .	69
A.1.2 Kardioidní arraye . . . . .	69
A.2 SPL rozložení . . . . .	70
A.3 Měřicí zařízení . . . . .	70
A.4 Charakteristika vyhodnocované místnosti . . . . .	70
<b>B Obsah přiloženého CD</b>	<b>71</b>

# Seznam obrázků

2.1	FAR . . . . .	23
2.2	FAR . . . . .	23
2.3	Směrové charakteristiky reálných všesměrových zdrojů.[19] . . . . .	24
2.4	Vliv zpoždění na vyzařovací charakteristiky arraye.[19] . . . . .	25
2.5	Vliv zakřivení na vyzařovací charakteristiky arraye.[19] . . . . .	26
2.6	Standartní model end-fire konfigurace.[19] . . . . .	27
2.7	Standartní model end-fire konfigurace.[19] . . . . .	27
3.1	Konstrukce Helmholtzova rezonátoru s porézním materiálem.[8] . . . . .	32
3.2	Příklad "feedforward active impedance control" systému.[8] . . . . .	33
4.1	Závislost absorpce PML vrstvy na její tloušťce a absorpci v Neperech.[8] . . . . .	35
4.2	Definice vstupů. . . . .	36
4.3	Závislost rychlosti zvuku ve zdi při konstantní hustotě $2300\text{kg/m}^3$ na koeficientu $\alpha$ . . . . .	37
4.4	Příklad výsledné impulsní odezvy při různých hodnotách absorpčního koeficientu. $\alpha = 0.9$ (nahore); $\alpha = 0.1$ (dole). . . . .	38
4.5	Příklad umístění subwooferové arraye v místnosti. Střed řady zdrojů $x=4\text{m}$ , $y=3\text{m}$ , $z=1,25\text{m}$ . . . . .	38
5.1	APR stupnice hodnocení.[10] . . . . .	42
6.1	Závislost maximální hladiny akustického tlaku na poloze zdrojů. . . . .	45
6.2	Porovnání gradientního a omni zdroje na modální frekvenci. . . . .	46
6.3	Porovnání gradientního a omni zdroje na modální frekvenci pro více míst. . . . .	46
7.1	Frekvenční charakteristika gradientní (nahore) a omni (dole) konfigurace. . . . .	48
7.2	Frekvenční charakteristiky gradientní a omni konfigurace vyhodnocené pomocí FDTD. Pozice rvní řady konfigurace $X = 3,64\text{ m}$ . . . . .	49
7.3	$X = 3,64\text{ m}$ (vlevo), $X = 4,1\text{ m}$ (uprostřed), $X = 2,4\text{ m}$ (vpravo). . . . .	49
7.4	Normalizovaný SV průběh závislý na frekvenčním vzorku a na mikrofonním bodě. Znázorněno zleva doprava (z pohledu FOH) s krokem 3 dB. Gradient (nahore), omni (dole). . . . .	50
7.5	SPL rozložení pro 31 Hz. . . . .	51
7.6	Naměřená frekvenční charakteristika gradientní a omni konfigurace. . . . .	52
7.7	Spatial variance reálného měření gradientní a omni konfigurace. . . . .	53
7.8	SV hodnoty pro jednotlivá frekvenční pásma. . . . .	53
7.9	Normalizovaná SV průběh závislý na frekvenčním vzorku a na mikrofonním bodě. Znázorněno zleva doprava (z pohledu FOH) s krokem 3 dB. Gradient (nahore), omni (dole). . . . .	54

7.10	Frekvenční charakteristiky kardioidní a omni konfigurace vyhodnocené pomocí FDTD. . . . .	55
7.11	Odchyly SV v 1/3 oktávových a 1/6 oktávových pásmech. . . . .	56
7.12	SV pro jednotlivé mikrofonní body. . . . .	56
7.13	Průběh SV pro různé mikrofonní body. Gradient nahore, omni dole. .	57
7.14	Rozložení SPL na pásmu 31 Hz (1/3 oktávy). . . . .	57
7.15	Rozložení SPL na pásmu 40 Hz (1/3 oktávy) . . . . .	58
7.16	Frekvenční charakteristika měření v místnosti pro gradientní a omni konfiguraci. . . . .	59
7.17	Grafické vyjádření SV pro obě konfigurace v jednotlivých frekvenčních vzorcích. . . . .	60
8.1	Hodnoty MD pro všechny konfigurace v závislosti na mikrofonní pozici (zleva doprava po sloupcích). . . . .	61
8.2	Průměrné odchyly SV gradientní a omni konfigurace. . . . .	62
8.3	Průměrné odchyly SV cardio, gradientní a omni konfigurace. . . . .	62
8.4	Průměrné odchyly SV kardioidní a omni konfigurace. . . . .	63
A.1	Vyzařovací pattern gradientní konfigurace na 63 Hz (volné pole). . . .	69
A.2	Vyzařovací pattern kardioidní konfigurace na 63 Hz (volné pole). . . .	69
A.3	SPL rozložení pro gradientní a omni konfiguraci na jednotlivých 1/3 oktávových pásmech. . . . .	70

# Seznam tabulek

- 7.1 Kvantifikace jednotlivých gradientních nebo omni konfigurací (FDTD). 50
- 7.2 Kvantifikace jednotlivých gradientních nebo omni konfigurací (měření). 54
- 7.3 Kvantifikace jednotlivých koeficientu u kardioidní a omni konfigurace. 56



# Úvod

Interakce zvukových vln s různorodými materiály rozdílných tvarů a struktur povrchů, je fundamentem celého tématu prostorové akustiky. Optimalizaci prostoru pro hudební produkci předchází architektonický návrh, který formuje celou myšlenku, jakým způsobem je prostor užíván. Při hledání vhodných akustických řešení je proto nutné využít metod predikce, které dopředu napoví co lze od architektonického návrhu očekávat, případně nám pomůže záměry architekta uzbúsobit ideálními podmínkami. Kvalita prostoru je kvantitativně hodnocena množstvím vlastností jako doba dozvuku, difuzita prostoru, srozumitelnost a obecně další vlastnosti, které popisují změnu zdroje a jeho následný vjem. Jedná se tedy o kombinaci vlastností elektromechanických měničů, akustických vlastností prostoru a média a psychoakustiky, přičemž poslední jmenovaná je považována za nejméně objektivní a nejvíce proměnný faktor. Právě vlastnosti lidského sluchu se výrazně promítají do výsledného vjemu zvuku, jelikož při vyšších hladinách akustického tlaku tyto vlastnosti zásadně mění predikování lineárního systému, jak ho chápeme z fyzikálního hlediska.

Současným trendem, především živé reprodukováné hudby, je koncentrace zvukové energie na nízkých kmitočtech. Pokud tohle množství energie interaguje v uzavřeném prostoru s některou ze stěn, nastávají silné odrazy. Odrazy zásadně mění charakter časové a spektrální odezvy reprodučního systému. Důsledkem jsou spektrální a časové změny v závislosti na poloze, což z hlediska rovnoměrné distribuce zvukové energie napřím publikem, není příznivý jev.

V oblasti středových a vysokých frekvenčních pásem se objevují především problémy s lokalizací a se stereo obrazem, které lze ale snadno řešit změny pozice reproduktorů (stereo systémy) či přidáním dodatečných reproduktorů (surround systémy). Problematika nízkých kmitočtů však nenabízí podobně jednoduché řešení a optimalizaci.

Z obecných předpokladů psychoakustiky víme, že citlivost lidského sluchu na nízkých kmitočtech je nízká a závislá na hladině akustického tlaku [22]. Z těchto důvodů je daleko větší výkonová náročnost na nízkofrekvenční systémy a z toho vyplývající i fyzické rozměry dané kvantitou měničů.

Akustické parametry uzavřeného prostoru lze simulovat pomocí predikčních programů (např. EASE [7]), kdy se jedná o přesné predikce v oblasti nad 100 Hz založené na geometrické akustice. Nízké kmitočty se potýkají s problémem neaplikovatelnosti geometrické akustiky a simulace na nízkých kmitočtech vychází z vlnových metod.

V průběhu posledních tří desítek let se díky line array systémům značně zlepšila distribuce zvuku i akusticky neideálních podmínkách, vlivem jejich směrového vyzářování. Vývoj v této oblasti je za tu dobu značně pokročil a v současné době se na

trhu objevují systémy, které mají kardioidní charakter [6]. Line-array v kombinaci s kardioidní charakteristikou výrazně zlepšují distribuci přímého zvuku a zvyšují tak poměr mezi přímým a odraženým zvukem.

Prostorová akustika na nízkých kmitočtech je charakterizována módy místnosti. Ty vznikají na základě relace mezi rozměry prostoru a vlnovou délkou zdrojových vln. V závislosti na sledovaném bodě v místnosti vznikají výrazné rozdíly v amplitudě na modálních frekvencích. Aby se zamezilo výchýlkám v řádech desítek decibelů, může se na systém aplikovat celá řada optimalizačních metod, z nichž některé jsou spíše experimentálního rázu, některé naopak využívané i v praktických aplikacích. Systém je v tomhle ohledu celý elektroakustický řetězec, který může být optimalizován pomocí DSP, fyzického umístění zdrojů a v neposlední řadě i aplikací akustických prvků. Vybrané aspekty budou podrobeny studiu a následné aplikaci v simulacích a reálném měření.

# 1 Základy prostorové akustiky

## 1.1 Vlnová rovnice

Vlnová rovnice vychází z předpokladu, že částice přenosového média vlny vytváří pohyb. Vlna může být tedy popsána změnou polohy částic média. Tento pohyb, neboli vibrace, je fázově proměnný v závislosti na poloze v místnosti. Tzn. částice jsou v některých místech prostoru stlačovány a někde naopak roztahovány. [16]

Vlnová rovnice vychází ze tří základních rovnic – rovnice kontinuity, stavová rovnice plynu a pohybová rovnice. [4]

### 1.1.1 Pohybová rovnice

Pohybová rovnice je odvozena pomocí malého objemu plynu uzavřeného v pravoúhlem prostoru o rozměrech  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  a  $\Delta z$ . Pokud na tento uzavřený prostor o objemu  $V = \Delta x \Delta y \Delta z$  působí síla  $f$ , dochází ke změně akustického tlaku [4]

$$-\nabla p = \frac{f}{V}. \quad (1.1)$$

Tuto změnu tlaku také vyjádřit, za předpokladu  $\rho' = M/V$ , jako celkovou změnu rychlosti částic  $Du$

$$-\nabla p = \frac{M}{V} \frac{Du}{Dt}, \quad (1.2)$$

a pokud je vektor rychlosti částic dostatečně malý, můžeme předpokládat, že celková změna hybnosti  $Du/Dt$  je rovna hybnosti v jednom stálém bodě, tedy  $Du/Dt = \partial u / \partial t$  a i okamžitá hustota je neměnná, tedy rovna průměrné hustotě  $\rho_0$  a pohybovou rovnici můžeme vyjádřit jako [4]

$$-\nabla p = \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (1.3)$$

### 1.1.2 Stavová rovnice plynu

Rovnice vychází z Charles–Boyleho zákona ideálního plynu

$$PV = RT, \quad (1.4)$$

kde  $P$  je celkový tlak,  $V$  je objem  $\Delta x \Delta y \Delta z$ ,  $R$  je plynová konstanta a  $T$  je absolutní teplota v Kelvinech. [4] Pro adiabatické rozpínání plynu předpokládáme  $PV^\gamma = konst.$ . Poissonova konstanta  $\gamma$  pro dvouatomový plyn, v našem případě vzduch, je 1,4.

Pokud rovnici ideálního plynu vyjádříme v diferenciálním tvaru, dostáváme

$$\frac{dP}{P} = -\frac{\gamma dV}{V}. [4] \quad (1.5)$$

Nahradíme celkový tlak a objem rovnicemi  $P = P_0 + p$  a  $V = V_0 + \tau$ . Hodnoty  $\tau$  a  $p$ , tedy okamžité přírůstky akustického tlaku a objemu, jsou mnohonásobně menší nežli střední hodnoty tlaku a objemu. Tzn.  $\tau \ll V_0$  a  $p \ll P_0$  a rovnici 1.9 upravíme do tvaru

$$\frac{p}{P_0} = -\frac{\gamma \tau}{V_0} \quad (1.6)$$

a následnou derivací podle času dostaneme vyjádření rovnice ideálního plynu

$$\frac{1}{P_0} \frac{dp}{dt} = -\frac{\gamma}{V_0} \frac{d\tau}{dt}. \quad (1.7)$$

### 1.1.3 Rovnice kontinuity

U rovnice kontinuity vycházíme ze zákona o zachování hmotnosti, kdy

$$-\nabla u = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1.8)$$

,kterou upravíme pomocí  $\kappa = \rho c^2$

$$-\nabla u = \frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (1.9)$$

## 1.2 Odraz, absorpce a impedance

Šíření zvuku v prostoru definujeme dvěma hlavními veličinami - akustickým tlakem  $p$  a vektorem rychlosti částic  $u$ . Akustický tlak je skalární veličinou, která je definována jako normálová složka k vektoru rychlosti částic.

Pokud dojde k interakci s překážkou, dochází k odrazu, kdy je část energie z příchozí vlny odražena jako sekundární vlna. Odražená vlna má rozdílnou amplitudu a částečně interferuje s příchozí vlnou za vzniku stojatých vln. [16]

### 1.2.1 Odrazivý faktor

Odraz můžeme vyjádřit v komplexním tvaru jako

$$R = |R| \exp(i\chi) \quad (1.10)$$

,kde  $|R|$  je absolutní hodnota magnitudy odrazu,  $\chi$  je fázový úhel, který je závislý na frekvenci a směru dopadu na odrazivou plochu. [16]

Absorpční koeficient se poté vyjádří jako

$$\alpha = 1 - |R|^2, \quad (1.11)$$

což znamená že pro plochu o odrazivosti  $R = 0$  je absorpční koeficient roven hodnotě 1. Tuto hodnotu považujeme za maximální a takovou plochu nazýváme jako plně absorpční. Naopak pokud je  $|R| = 1$  jedná se o plochu, která je absolutně odrazivá. K tomu může dojít ve v případě, kdy je  $R = 1$  a  $R = -1$ . Pokud je  $R = 1$ , dochází k odrazu ve fázi a označujeme jako 'hard'. Pokud je  $R = -1$ , odraz je fázově o otočen o  $\pi$  a označujeme plochu jako 'soft'. Tento typ ploch se však v prostorové akustice objevují zřídka. [16]

### 1.2.2 Akustická impedance

Impedance je další akustickou veličinou, která nám popisuje fyzikální vlastnosti odrazivých ploch. Popisuje fyzikální chování plochy, konkrétně pohyb částic média vedle této plochy. Definujeme ji jako

$$Z_\omega = \frac{p}{u_n} \quad (1.12)$$

, kde  $u_n$  je složka rychlosti kolmá na odrazivou plochu a  $p$  je akustický tlak. [16]

Pokud se zaměříme na impedanci nosného média, definujeme tzv. charakteristickou impedanci vzduchu  $\rho_0 c = 414 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Pokud dělíme akustickou impedanci plochy charakteristickou impedancí vzduchu, získáváme **specifickou akustickou impedanci**

$$\xi_\omega = \frac{Z_\omega}{\rho_0 c}. \quad (1.13)$$

Inverzním vyjádřením specifické akustické impedance získáme vyjádření pro **specifickou akustickou admitanci**

$$Y_\omega = \frac{1}{\xi_\omega}. \quad (1.14)$$

## 1.3 Metody fyzikálního modelování zvukového pole v prostoru

Oblast simulování akustických prostorů zahrnuje modelování vlastností samotného prostoru, stejně jako vlastnosti zdrojů zvuku a v neposlední řadě i charakteru příjemce. Nazýváme ji jako tzv. virtuální akustiku. Jedna z částí této oblasti je i auralizace, kdy se modeluje binaurální slyšení v daném prostoru v přesně definovaném

místě. Modelování akustiky se dělí do 2 hlavních kategorií. geometrické a tzv. 'wave-based' metody. [16]

### 1.3.1 Geometrické metody

Geometrické metody nahrazují zvukové vlny zvukovými paprsky. Pokud zvukové vlny definujeme geometrickou optikou, zvukovým paprskem myslíme malou část sférické vlny s velmi malou výsečí vycházející z určitého bodu (tzn. střed sférické vlny). Tohle zjednodušení v praxi může fungovat jen za předpokladu kdy je vlnová délka kratší, nežli velikost plochy, s kterou vlna interaguje. Pro delší vlnové délky tedy tato metoda není vhodná, jelikož nezahrnuje difrakce na hranách objektů a podobně. Difrakci je možné simulovat pomocí speciálních zdrojů zvuku na hranách objektu.[16]

Geometrickou metodu používá komerční software, např. Oden nebo Diva. Software odeon vytváří impulsovou odezvu pomocí geometrické metody, tzv. image source method. Image source method je zde používána na vytváření prvotních odrazů v prostoru. Pro modelování difuzního pole poté využívají metodu ray tracing. [15]

#### Image source metoda

Tato metoda je založena na získávání zrcadlových obrazů zvukových zdrojů z nichž se získávají přímé paprsky z těchto zrcadlených zdrojů. Tyto paprsky obrazu jsou zpožděny a zeslabeny v závislosti na vzdálenosti mezi původním zdrojem a přijímačem.

V praxi to znamená, že tato metoda nalezne všechny možné cesty mezi zdrojem zvuku a posluchačem. Výpočetní náročnost roste exponenciálně s n-tým řádem odrazu. Tato nevýhoda způsobuje, že lze image source metodu použít pouze na prvotní odrazy. Při reálném odraze navíc dochází k tomu, že jen část vlny se odrazí podle zrcadlového obrazu a část je odražena difúzně. Pokud se u této metody zaměříme na difrakci, lze ji úspěšně simulovat pomocí speciálních okrajových zdrojů a jen pro pevné plochy, tzn. bez možnosti simulovat plochy s impedancí. Jak už bylo v úvodu řečeno, software Odeon používá tuto metodu pro prvotní odrazy a pozdní odrazy jsou počítány pomocí ray tracing metody. [15]

#### Ray tracing

Namísto hledání zrcadlových obrazů jsou zvukové vlny vyzářeny všemi směry od zdroje a interagují s plochami. Úbytek zvukové energie  $1/r^2$  je závislý na vzdálenosti, jakou paprsek urazí. K tomu jsou započítány další aspekty jako absorpce ploch a absorpce prostředí(vzduchu). Přijímač, v našem případě posluchač, je modelován jako objem v prostoru, a pomocí průsečíku s tímto objemem je zjištěno, které paprsky se

podílejí na odezvě v daném místě. Další variantou metody je použití svazků paprsků (kuželů) a v tomto případě posluchač není objemem ale bodem v prostoru. [15]

Pokročilejší úroveň této metody je použití difúzních koeficientů, kdy difuzita dané plochy je frekvenčně závislá. Používá se tedy oddělené vyhodnocení v jednotlivých oktávových pásmech. Tato metoda však není vhodná pro simulaci difrakčních jevů.

## 1.4 Vlnové metody

Vlnová metoda oproti geometrické pracuje s přímým numerickým řešením vlnové rovnice. Výhodou vlnových metod je vynechání speciálních podmínek pro difrakci a interferenci vln. Navíc není třeba definovat pozici posluchače předem. Tento fakt by napovídal použití vlnových metod bez výhrady vždy. Jejich omezení však spočívá ve frekvenčním rozsahu, kdy vlnové metody velmi dobře predikují zvukové pole na nízkých a středních kmitočtech.

Existuje řada numerických možností řešení rovnic. Metody členíme podle typu elementů při výpočtu, kdy je použito rozdělení do prostorových elementů nebo rozdělení hraničních povrchů od povrchových elementů.

### 1.4.1 Finite-difference time-domain (FDTD) metoda

U FDTD metody je modelovaný prostor rozdělen na rovnoměrně uspořádanou síť. K výpočtu se používá parciálních derivací druhého řádu vlnové rovnice, které jsou aproximované pomocí konečných diferencí. Celkové zvukové pole je vypočteno časově iteračním způsobem – tzn. výpočet zvukového pole je prováděn v určitém časovém kroku (perioda vzorkovací frekvence) z předhozí vypočtené hodnoty. [5]

Výpočetní náročnost se nezvyšuje exponenciálně s přibývajícím  $n$ -tým řádem odrazu. Výpočet pomocí síťové struktury je pro časovou i směrovou správnost výpočtů přímých i odražených vln velmi vhodný, jelikož neobsahuje chyby při výpočtech. Pokud se jedná o vyšší frekvence, zde můžou nastat výpočetní chyby v souvislosti s numerickou disperzí. Disperze vzniká, když rychlost šíření vlny je závislá na její vlnové délce. Právě vlivem prostředí na vysokých frekvencích dochází ke změně rychlosti a při výpočtu tedy vzniká numerická disperze. Podobnou metodou k FDTD je digital waveguide mesh (DWM) metoda, která je s FDTD matematicky ekvivalentní. [15]

V obecném důsledku, algoritmy založené na síťové struktuře, jsou použitelné pro celé vygenerované zvukové pole a právě z tohoto důvodu odrazy vyšších řádů nezatěžují výpočetní paměť. Díky modelování pomocí síťové struktury jsou jevy jako interference a difrakce modelovány věrně. To způsobuje, že metoda je zvláště

užitečná pro modelování šíření zvukových vln na nízkých kmitočtech, kde selhávají geometrické metody. [5]

### **1.4.2 Finite element metoda (FEM)**

Finite element metoda rozděluje objem prostoru na malé elementy náhodných rozměrů a tvarů, v kterých jsou vypočítány hodnoty akustického tlaku. Akustický tlak je souvislý na celé ploše jednoho elementu. [23]

Pokud tuto metodu porovnáme s FDTD, FEM je více přesný, nicméně výpočetně náročnější v souvislosti s předpočítáváním hodnot. FEM má naopak výhodu v nepravidelných tvarech elementů, kdy jsme schopni docílit plynulejšího rozlišení pokud jde o definování ploch nerovnoběžných z některou z os – tedy nepoužívá schodovitých diferencí u nerovnoběžných ploch s jednou z os, jako je tomu u FDTD.

### **1.4.3 (Boundary element method (BEM)**

BEM vychází z Helmholtz-Kirchoffova integrálu definující tlak v určitém bodě jako sumu akustického tlaku zdroje a povrchového integrálu tlaku a jeho derivací na plochách způsobující odrazy. Metoda tedy používá výsledků numerické řešení tohoto integrálu ve frekvenční oblasti. Abychom dosáhli správných výsledků, mělo by být velikost elementů maximálně  $1/8$  vlnové délky, kterou simulujeme.[8]

### **1.4.4 Transmission line method (TLM)**

Podobně jako FDTD je tato metoda transmission line založena na kubicky rozděleném modelu prostoru. Metodu můžeme nazvat jako metodu přenosové linky, kdy zvukový impuls je sledován na tzv. větvích mezi uzly. V každém uzlu jsou poté sečteny všechny impulsy ze všech 6 směrů.[23]



## 2 Zdroj zvuku

### 2.1 Rovinná vlna

Zvuková vlna se v prostředí šíří pomocí vlnové rovnice

$$c^2 \Delta p = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (2.1)$$

kde  $\Delta$  je Laplaceův operátor,  $c$  je rychlost zvuku,  $p$  je akustický tlak a  $t$  je čas. Pro rovinnou vlnu však předpokládáme, že tlak je funkcí času pouze jedné prostorové proměnné. K vytvoření takového typu vlnění je zapotřebí mít nekonečně dlouhý zdroj zvuku. Směr normálou k čelu vlny, která má konstantní tlak. Pro propagaci takové vlny, za předpokladu směr propagace je shodný se směrem osy  $x$ , můžeme použít zápis vlnové rovnice ve tvaru

$$c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (2.2)$$

Obecné řešení této rovnice v diferenciálním tvaru je

$$p(x, t) = F(ct - x) + G(ct + x), \quad (2.3)$$

kde  $F$  a  $G$  jsou funkce s existující druhou derivací, kde  $F$  je vlna pohybující se v pozitivním směru osy  $x$  zatímco  $G$  je vlna negativně orientovaná. Jelikož vlnová rovnice je definována v jednom směru, pro rychlost částic tedy platí že má pouze jednu složku a to paralelní se směrem šíření

kde  $\rho_0$  je hustota okolního média.

Předpokládáme  $G = 0$ , tudíž poměr mezi akustickým tlakem  $p$  a rychlostí částic  $u$  je

$$\frac{p}{u} = \rho_0 c. \quad (2.4)$$

Tento poměr je *charakteristická impedance* média a není frekvenčně závislá. Pokud dosadíme  $G = 0$  do rovnice 2.3 a  $F$  vyjádříme jako cosinovou funkci, dostaneme následující vyjádření

$$p(x, t) = p e^{(\omega t - kx)}, \quad (2.5)$$

kde  $p$  je amplituda akustického tlaku (max. hodnota),  $\omega = 2\pi f$  je úhlová frekvence a  $k = 2\pi f/c$  je vlnové číslo.

Úpravami provedených v [16] a následném vyjádření v komplexním tvaru se akustický tlak může vyjádřit následovně:

$$p(x, t) = p \cos[k(ct - x)] = p \cos(\omega t - kx). \quad (2.6)$$

## 2.2 Sférická vlna

U sférických vln je akustický tlak rovnoměrně rozložen na povrchu koule. Místo kartézského koordinačního systému je přirozenější použít sférický koordinační systém. Akustický tlak je poté závislý na vzdálenosti  $r$  od zdroje a čase a můžeme vlnovou rovnici zapsat jako

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{c} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (2.7)$$

Sférická vlna se vytváří pomocí fyzického bodového zdroje, který je malý v porovnání s vlnovou délkou. To znamená, že zdroj je pomyslným bodovým zdrojem, který přivádí a odvádí médium objemovou rychlostí  $Q$ . Řešením předchozí rovnice tedy bude

$$p(r, t) = \frac{\rho_0}{4\pi r} \dot{Q} \left( t - \frac{r}{c} \right), \quad (2.8)$$

kde  $\dot{Q}$  je parciální derivace objemové rychlosti v závislosti na čase. Argument  $t - r/c$  znamená, že rychlost pohybu vlny směrem od zdroje je  $c$  a její síla klesá nepřímo úměrně na vzdálenosti  $1/r$ .

Pokud vycházíme z předpokladu, že jediná neměnná složka je radiální rychlost částic, kterou můžeme vyjádřit pomocí dosazení rovnice 2.5 do předchozího tvaru, tedy:

$$u_r = \frac{1}{4\pi r^2} \left[ Q \left( t - \frac{r}{c} \right) + \frac{r}{c} \dot{Q} \left( t - \frac{r}{c} \right) \right]. \quad (2.9)$$

Pokud přidáme časové vyjádření  $Q(t) = Qe^{i\omega t}$  do rovnice 2.8 můžeme tuto rovnici vyjádřit

$$p(r, t) = \frac{i\omega\rho_0}{4\pi r} \dot{Q} e^{i(\omega t - kr)}. \quad (2.10)$$

Za předpokladu  $k = \omega/c$  rovnici 2.9 vyjádříme jako

$$u_r = \frac{p}{\rho_0 c} \left( 1 + \frac{1}{ikr} \right). \quad (2.11)$$

Řešením pro  $p/u_r$ , tedy řešení pro charakteristickou impedanci média sférické vlny je

$$\frac{p}{u_r} = \frac{\rho_0 c}{1 + 1/ikr}. \quad (2.12)$$

## 2.3 Reálné zdroje

V soudobé reprodukované hudbě se v oblasti pod 100Hz nachází velké množství akustické energie. Cílem sound system designu je tuto energii správně roz distribuovat. Používá se několik metod, které výrazně ovlivňují vyzařování soustavy zdrojů zvuku.)

Subwoofery mají obecně unikátní vlastnosti, které nám vytvářejí možnost pracovat s nimi jako (a) separátními zdroji s limitovaným frekvenčním rozsahem a (b) se zdroji, jejichž vlnové délky umožňují ohyb vln okolo objektů (např. ohybem kolem reálné ozvučnice vedlejšího subwooferu). V reálných podmínkách se vyskytují jako všesměrové zdroje, nebo kardioidní zdroje. [19]

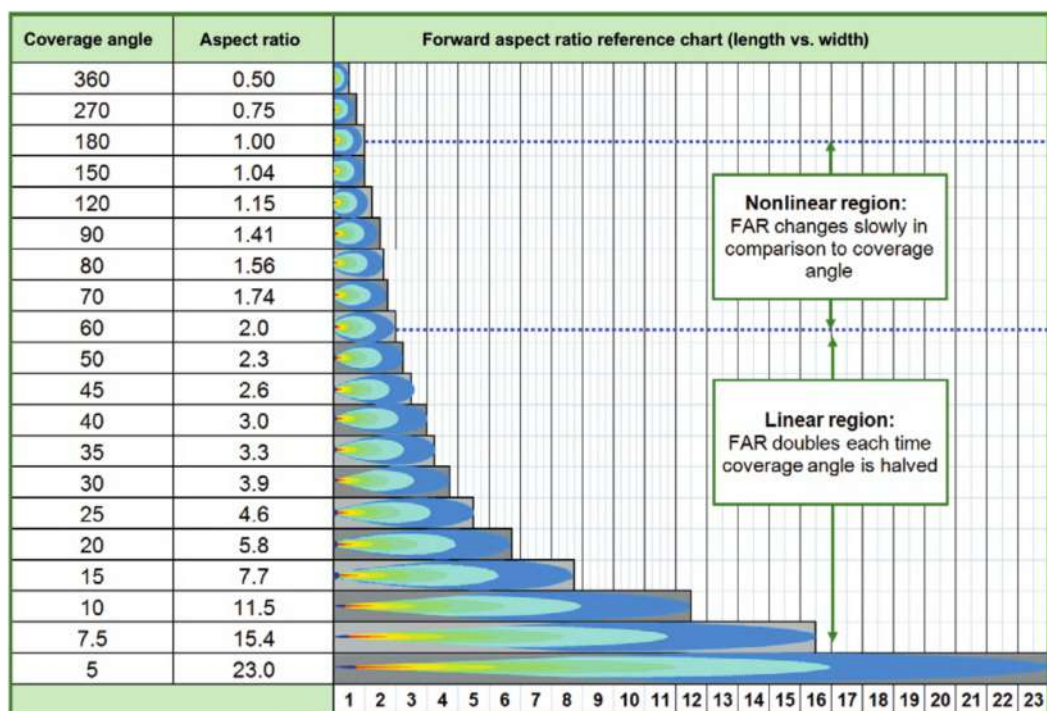
Dříve, nežli začneme pracovat se sumací více zdrojů, je třeba analyzovat subwoofer jako bodový zdroj. V reálných podmínkách se subwoofery nechová jako všesměrový zdroj a můžeme u něj definovat tzv. **forward aspect ratio (FAR)**. FAR definuje McCarthy ve své knize [19] jako poměr mezi délkou a šířkou vyzařovacího patternu zdroje. Je to poměr, který je běžně používán architekty k vyjádření poměrů stran místnosti, což defacto koresponduje se snahou distribuce signálu v místnosti v podobném poměru jako jsou jeho strany. Geometricky můžeme FAR popsat jako trojúhelník o vrcholech v: (a) zdroj zvuku, (B) bod na ose reproduktoru v určité vzdálenosti od zdroje a (C) bod mimo osu reprodukturu v polovině této vzdálenosti kdy platí, že B a C mají stejné hodnoty akustického tlaku.

V následující tabulce McCarthy uvádí příklady úhlu pokrytí a příslušné hodnoty FAR.

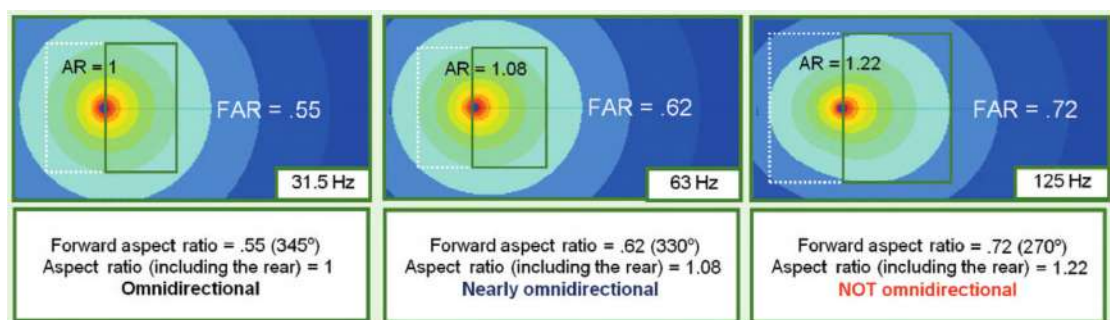
Dalším parametrem, který definujeme při vyzařování zdroje je **aspect ratio (AR)**. Aspect ratio udává předozadní poměr vyzařování. Abychom se vrátili zpět k analýze zdroje, předpokládané FAR teoretického všesměrového zdroje je 0,5 a AR je 1. Pokud se však zaměříme na reálný subwoofer, můžeme v následujícím porovnání vidět, že tyto hodnoty téměř platí při 31,5 Hz. S přibývajícím hodnotou frekvence však mají tyto hodnoty značné odchylky od teoretických. Tyto vlastnosti se projeví ještě výrazněji v případě, že bychom z těchto zdrojů vytvářeli kombinace.

## 2.4 Subwooferové arraye

Kombinací všesměrových zdrojů můžeme vytvářet směrové arraye. Rozlišujeme je jako coupled nebo uncoupled arrays. V našem zájmu budou coupled arraye, jelikož uncoupled se projevují výrazným zvlněním frekvenční charakteristiky (tzv. ripple variance). Pokud tedy předpokládáme coupled arraye, rozlišujeme další 3 typy těchto arrayů – coupled line source, coupled point source a kardioidní arraye.



Obr. 2.1: Směrové charakteristiky reálných všesměrových zdrojů.[19]



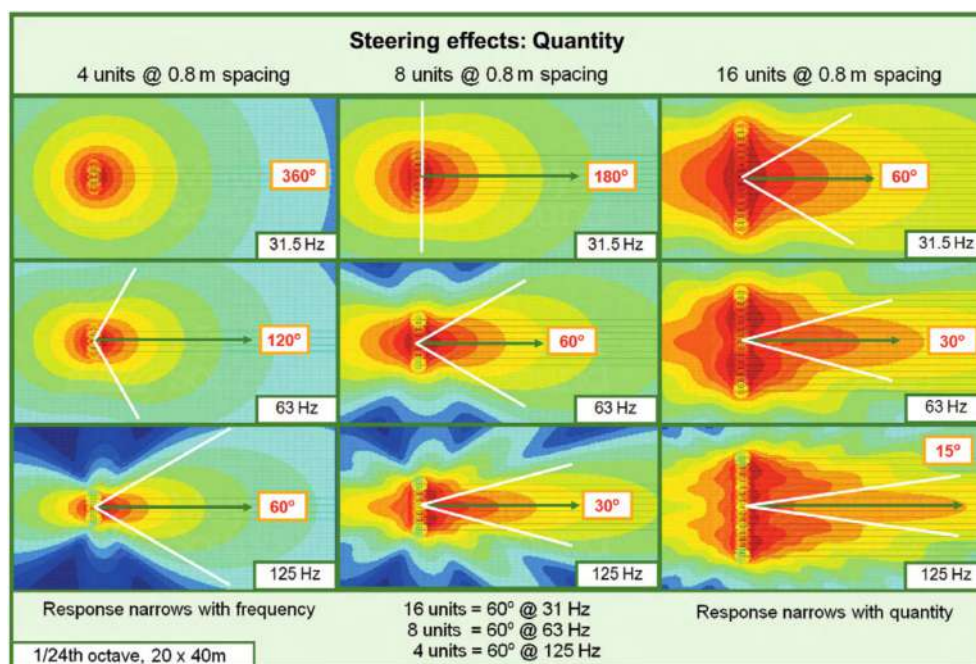
Obr. 2.2: Směrové charakteristiky reálných všesměrových zdrojů.[19]

## 2.4.1 Coupled line source array

Soustava bodových zdrojů tvoří liniový zdroj zvuku, který je charakteristický progresivním zužováním vyzařovacího patternu se zvyšující se frekvencí. S tím souvisí i fyzická délka arraye, kdy při zdvojnásobení délky se její vyzařovací úhel zmenší dvojnásobně, což je demonstrováno na simulacích v obrázku 2.3

Tento princip je významným faktorem u jakékoliv řady bodových zdrojů (např. line-array reproduktory). Tohle chování je ve většině případů nevhodné, jelikož dochází k tzv. spectral variance. Můžeme říct, že je to odchylka ve spektru. Tzn. vyzařování arrayí v 2.3 se vyznačuje vysokými odchylkami mezi jednotlivými frekvencemi, jelikož dochází k progresivnímu zužování vyzařovacího patternu. Tohle vyzařování se snažíme měnit několika metodami.

U subwooferových line-source arrayí můžeme vyzařování ovlivnit vložením asy-

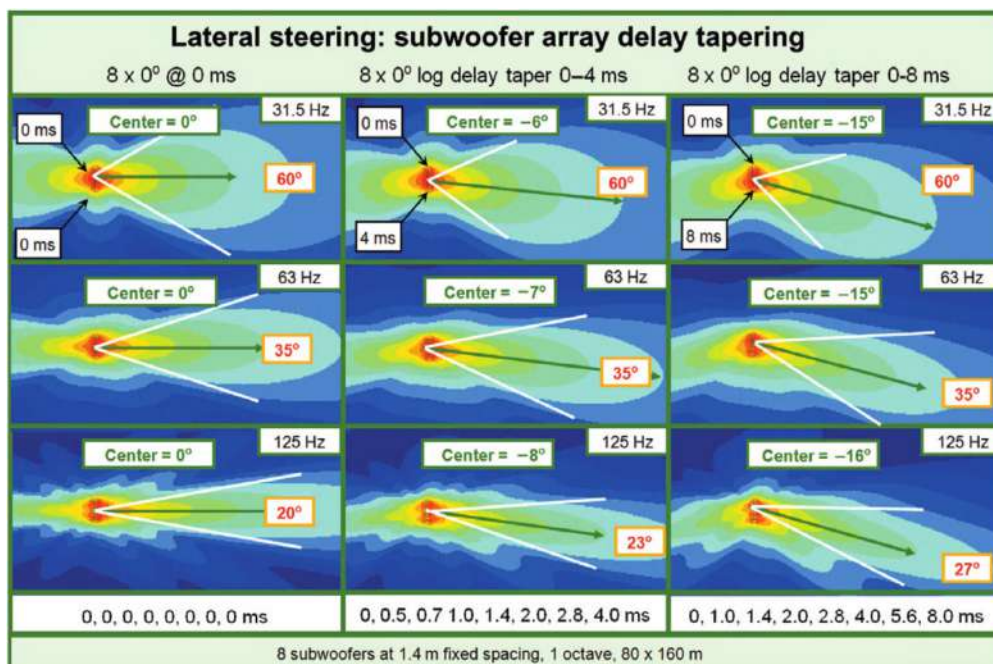


Obr. 2.3: Směrové charakteristiky reálných všesměrových zdrojů.[19]

metrického delaye na jednotlivé elementy – tzn. přidáním časového offsetu jsme schopni ovlivnit vyzařování (viz. obr.2.5). Další pokročilejší metodou je vložení frekvenčně závislého delaye (např. all-pass nebo FIR filtr). To nám umožní vložit fixní fázový offset, který se projeví jako proměnný časový offset v závislosti na frekvenci (tzv. group delay). Časovým offsetem můžeme směřovat zvukovou energii žádaným směrem a také tedy rozšiřovat vyzařovací pattern, což je patrné na simulacích 2.5. Při největších hodnotách zpoždění dochází na 125Hz k vychýlení patternu o 16° a k rozšíření patternu o 7°.

## 2.4.2 Coupled point source array

Podobným způsobem lze měnit i vyzařování bez aplikace zpoždění na jednotlivé elementy. Dosáhneme ho zakřivením arraye do oblouku. V praxi se příliš nepoužívá už jen z hlediska nároků na prostor.



Obr. 2.4: Vliv zpoždění na vyzařovací charakteristiky arraye.[19]

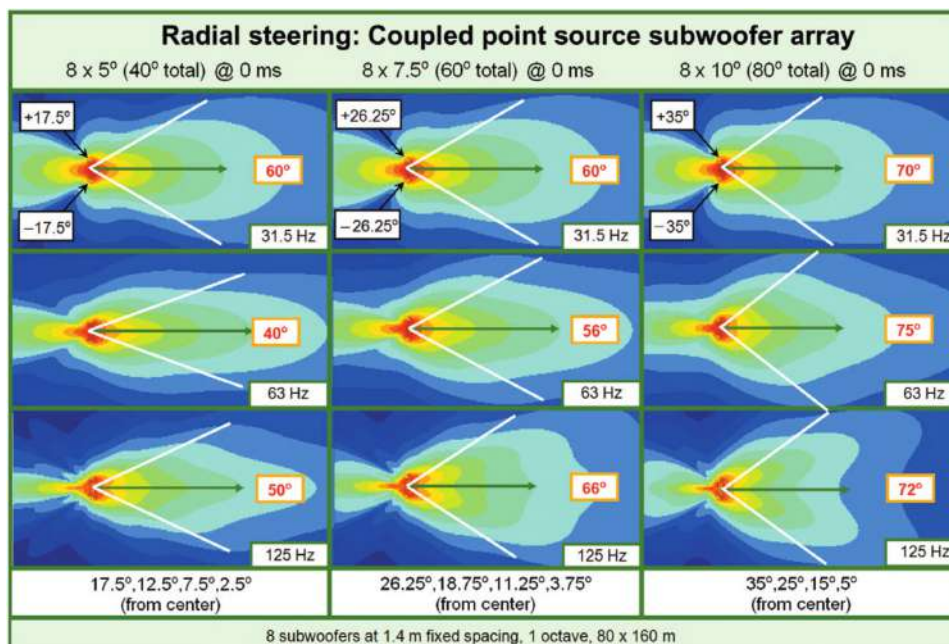
## 2.5 Kardioidní subwooferové arraye

Důvodů proč se využívají subwoofery v této konfiguraci je celá řada. Většinou není moc důvodů, proč je nepoužít. Ve většině případů plyne z těchto konfigurací spousta pozitivních vlastností, které převažují nad těmi negativními. V praxi je jeden z hlavních důvodů útlum subwooferů na podiu. Nicméně z hlediska naší práce nás nejvíce zajímá *zlepšení D/R poměru a optimalizace patternu*. [19] Nejčastějším použitím je end-fire a gradientní array.

### 2.5.1 End-fire

End-fire konfigurace pracuje pouze se zpožděním elementů a vzdáleností mezi elementy ve směru vyzařování. Velikost zpoždění každé řady je závislé na fyzické vzdálenosti těchto řad. McCarthy operuje s  $2.9ms/1m$  a end-fire konfigurace je názorně vysvětlena na obrázku 4.2. Vepředu tedy dochází zvuková vlna ve stejný čas, tedy s nulovým fázovým i časovým zpožděním. Dozadu naopak dochází s rozdílným fázovým i časovým zpožděním každého elementu – tím dochází k odečtu, jelikož elementy jsou fázově nekoherentní. Fázové hodnoty (phase angles behind/front) jsou relativní hodnoty fázového zpoždění, přičemž referenční hodnota fázového zpoždění je  $[0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]$  a od ní se odvíjejí tyto relativní hodnoty. Důležitý je fázový offset mezi řadami, kdy vepředu vychází fázový rozdíl  $[0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]$  a tedy dochází k součtu signálů. Vzadu je fázový rozdíl větší než  $0^\circ$ , tím pádem dochází k odečtu.

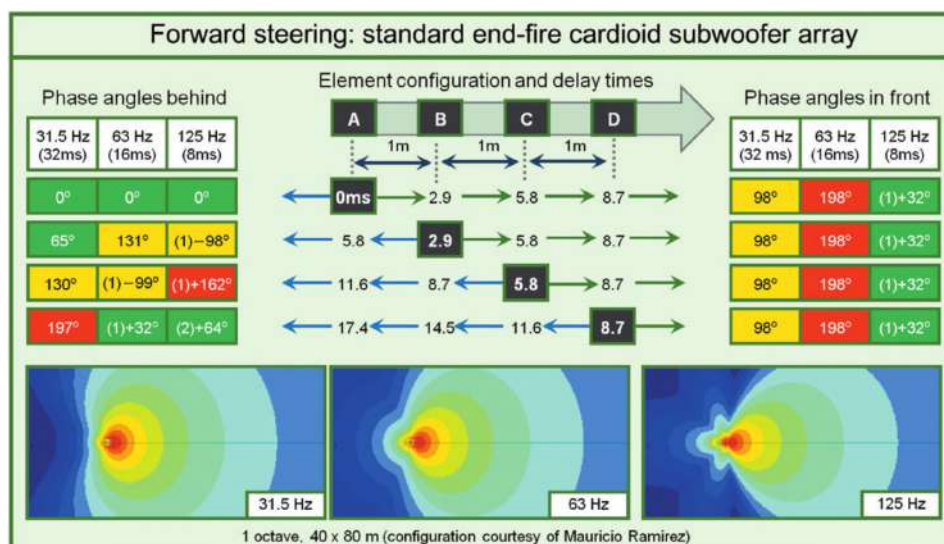




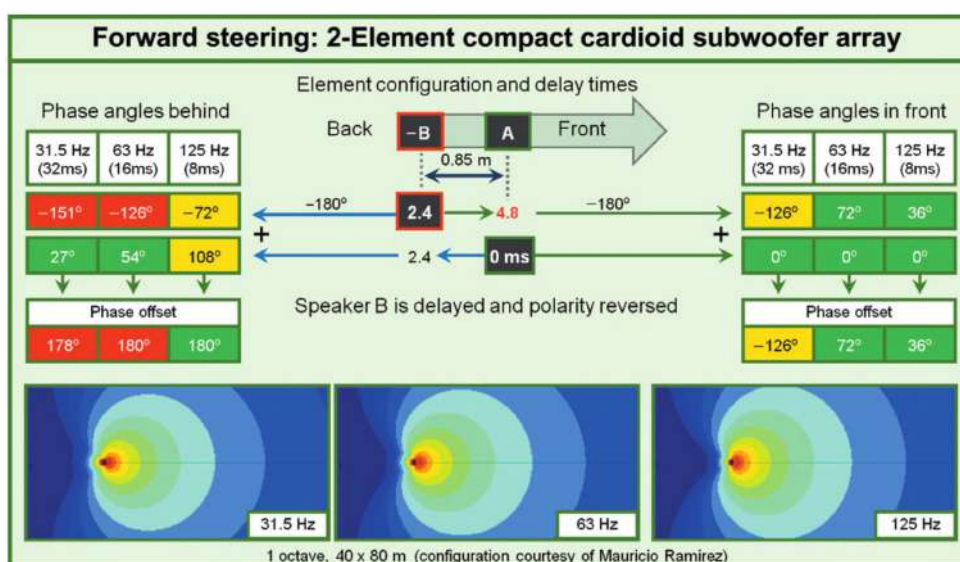
Obr. 2.5: Vliv zakřivení na vyzařovací charakteristiky arraye.[19]

## 2.5.2 Gradient (in-line)

Další kardioidní konfigurací je tzv. in-line gradietní array (obr. 2.7). Skládá se ze 2 řad subwoferů, kdy zadní subwoofer je zpožděný a s otočenou polaritou. Vzadu dochází k dokonalému odečtu, nicméně v přední části není součet ideální a vytváří se fázový offset, který způsobuje nárůst SPL pouze o 3dB ač bychom při použití 2 zdrojů měli docílit +6dB. Dostáváme tedy frekvenčně závislou efektivitu vepředu výměnou za celospektrální odečet vzadu.



Obr. 2.6: Standartní model end-fire konfigurace.[19]



Obr. 2.7: Standartní model end-fire konfigurace.[19]

### 2.5.3 Gradient (inverted stack)

Funguje na stejném principu jako in-line array s tím rozdílem, že dochází k fyzickému otočení jednoho elementu o 180°. Výsledkem je pouze jedna řada elementů, z nichž je jeden otočen, zpožděn a s opačnou polaritou oproti dalším elementům v arrayi. Typická konfigurace je 2 elementy mířící dopředu a 1 dozadu. Opět dochází k celospektrálnímu odečtu dozadu a k horšímu součtu vepředu.



## 3 Zvukové vlnění v uzavřeném prostoru

### 3.1 Módy v pravoúhlé místnosti

Za pravoúhlý prostor považujeme místnosti s paraelními dvojicemi protějších stran. Takový prostor prakticky neexistuje, ovšem k tomuto zjednodušenému modelu se blíží většina staveb, ať už to jsou koncertní sály, sportovní haly, kostely, učebny a další.

Nejprve definujeme prostor, který zaujímá prostor  $x = 0$  až  $x = L_x$  ve směru osy  $x$ ,  $y = 0$  až  $y = L_y$  ve směru osy  $y$  a totéž tedy ve směru  $z$   $z = 0$  až  $z = L_z$ .

Předpokládáme stěny, které jsou rigidní. To znamená, že normálové složky rychlosti částic vymizí. V kartézských souřadnicích má Helmholtzova rovnice tvar

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0 \quad (3.1)$$

a pokud rozdělíme proměnné, vyjádření celkového akustického tlaku bude rozděleno na příslušné složky, které souvisí pouze s jednou prostorovou proměnnou následovně[16]:

$$p(x, y, z) = p_x(x) \cdot p_y(y) \cdot p_z(z). \quad (3.2)$$

Vyjádření pro jednu složku této rovnice (např.  $x$ ) bude následovné [16]:

$$\frac{\partial^2 p_x}{\partial x^2} + k_x^2 p_x = 0 \quad (3.3)$$

s hraničními podmínkami pro  $x = 0$  a  $x = L_x$

$$\frac{dp_x}{dx} = 0. \quad (3.4)$$

Pro další složky bude řešení obdobné. Uvažujeme, že konstanta  $k$  je součte dílčích konstant  $k_x, k_y, k_z$ , kde

$$k_x = \frac{n_x \pi}{L_x} \quad (3.5)$$

a vyjádření  $k_y, k_z$  je obdobné.

Poté můžeme součet těchto konstant vyjádřit jako

$$k_{n_x n_y n_z} = \pi \left[ \left( \frac{n_x}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{n_y}{L_y} \right)^2 + \left( \frac{n_z}{L_z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

Tohle vyjádření jsou 'eigenhodnoty', které lze vynásobit cosiny příslušných souřadnic a můžeme vyjádřit celkový akustický tlak, tzv. 'eigenfunkce' jako

$$p_{n_x n_y n_z}(x, y, z) = \cos \left( \frac{n_x \pi x}{L_x} \right) + \cos \left( \frac{n_y \pi y}{L_y} \right) + \cos \left( \frac{n_z \pi z}{L_z} \right) \quad (3.7)$$

kde  $n_x$  je nezáporné celé číslo [16].

Tato rovnice vyjadřuje 3D stojaté vlnění, tedy tzv. 'normálový mód' v místnosti. Nulové hodnoty akustického tlaku jsou ve všech bodech prostoru, kdy alespoň jeden z cosinů je roven 0. Z hlediska jednotkové kružnice jsou cosiny rovny nule, když je hodnota úhlu lichým násobkem  $\pi$ . Tedy hodnota  $L_x/2n_x$  musí být pro splnění této podmínky lichá (platí i pro další souřadnice). Tyto podmínky platí pro navzájem kolmé roviny, které nazýváme 'uzlové roviny'. Nezáporné celé čísla  $n_x, n_y, n_z$  značí počet těchto rovin. Modální frekvence můžeme vyjádřit dle následující rovnice

$$f_{n_x n_y n_z} = \frac{c}{2\pi} k_{n_x n_y n_z}. \quad (3.8)$$

Tyto módy jsou rozeznatelné ve frekvenční oblasti, kde jejich hustota je velmi nízká. Definujeme proto Schroederův kmitočet, který je dán vztahem

$$f_{schr} = 4000 \sqrt{\frac{RT}{V}} \quad (3.9)$$

, kde  $RT$  je doba dozvuku a  $V$  je objem místnosti. Příkladem může být simulovaná místnost, která bude analyzována v dalších kapitolách práce. S rozměry 12,4 m (x), 9,4 m (y) a 3,5 m (z) a průměrnou dobou dozvuku 0,8 s obdržíme hodnotu kmitočtu 135 Hz.

## 3.2 Rezonance

Rezonance vytváří uvnitř místnosti zabarvení akustických zdrojů, které se může projevat jako příhodné. Avšak v akustických prostorech, kde jediným objektivním kritériem je přesnost přenosu signálu z akustického zdroje, se strukturální rezonance prostoru příhodné jevit nebudou. Takovými rezonancemi rozumíme výrazné minima a maxima napříč spektrem. V následujícím textu budou probrány základní principy rezonancí.

### 3.2.1 Rezonance v trubici

Rezonance v trubici nám vysvětluje princip rezonance rovinné vlny v 1D rozměru. Pokud tato vlna dopadne na konec trubice, který nabývá jistou hodnotu impedance, vlna je odražena v závislosti na hodnotě impedance. Rezonance v trubici se vytváří za předpokladu, že odražená a zdrojová vlna jsou ve fázi. Ostatní frekvence vedou k tomu, že jsou vyrušeny a výsledkem je nulová amplituda těchto frekvencí [8]. Pro trubici, která má oba své konce buďto uzavřené nebo otevřené platí, že rezonanční kmitočty nabývají hodnot

$$f_n = \frac{nc}{2l}. \quad (3.10)$$

V rovnici je  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  a  $l$  je délka trubice. Zatímto v uzavřené trubici budou vznikat maxima na koncích trubice, u otevřené trubice na obou stranách dochází k tomu, že maximum stojaté vlny je naopak uprostřed trubice. Pro případ že jedna strana trubice má otevřený konec a protilehlá uzavřený, stojaté vlnění se tvoří na kmitočtech závislých následovně

$$f_n = \frac{(2n - 1)c}{4l}, \quad (3.11)$$

kde  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  a  $l$  je délka trubice.

### 3.3 Metody korekce vlastních kmitočtů prostoru

Na stojaté vlnění má vliv spousta faktorů, které se snažíme při reprodukci hudby eliminovat. Je více metod, které můžeme aplikovat (obsáhle diskutováno v [25]). Nutno podotknout, že v případě výstavby nových prostor, je základním předpokladem pro reprodukci hudby na nízkých kmitočtech geometrická rozvaha místnosti. Geometrie je naprosto zásadní. Při návrhu pravoúhlé místnosti by měla být dodržována podmínka poměrů stran

#### 3.3.1 Pasivní korekce - absorpce

Jednoduchou technikou snížení vlastních kmitočtů prostoru je zvýšení absorpce plochy. Absorpci na nízkých kmitočtech lze provést několika způsoby. Jedním z nich je rezistivní absorpce pomocí porézního materiálu [25]. Tato absorpce je založena na principu transformace pohybové energie částic na tepelnou. Rychlost částic stojatých vln má své minimum u odrazivé plochy a maximum v  $1/4$  vlnové délky. Z praktického hlediska jakákoliv aplikace porézního materiálu nemá účinnost, pokud se její tlouška, nebo poloha, neblíží  $1/4$  vlnové délky. To by pro 50Hz vlnu byla vzdálenost cca 1,71 m, což je z praktického hlediska naprosto limitující faktor.

V článku [12] je demonstrována redukce módů v závislosti na absorpci plochy. V modelu je předpokládána konstantní hodnota absorpce přes celé frekvenční pásmo. Bylo zjištěno, že míra absorpce má vliv na odchylky ve frekvenční charakteristice, nicméně tato změna je poněkud marginální (v článku [12] uvádí asi 5% snížení odchylek při navýšení absorpce 10x). Absorpce v celém pásmu má totiž za následek i úbytek odražených vln mimo frekvence stojatého vlnění a nedochází proto k tak výrazným změnám.

Daleko účinnější způsob je použití rezonátoru, který zvyšuje svoji účinnost právě na rezonančních kmitočtech a kopíruje tímto průběh frekvenční odezvy. Rezonanční

absorpce je charakteristická maximem absorpčního koeficientu na úzkém pásmu frekvencí a záměrem při návrhu je šířku rozšiřovat k absorpci v rámci alespoň 1/3 oktávy (viz. [8]).

Rozlišujeme 2 typy rezonátorů – Helmholtzův a membránový (panelový) rezonátor, z nichž každý má jiný model rezonance a následně i jiné akustické vlastnosti.

### Helmholtzův rezonátor

Helmholtzův rezonátor funguje na principu systému hmotného tělesa na pružině. Základem je perforovaný povrch a vzduchová dutina za tímto povrchem. Přítomnost vzduchu v dírách či štěrbinách na povrchu reprezentuje hmotnost a objem vzduchu dutiny reprezentuje tuhost pružiny v analogii s jednoduchým příkladem hmotného tělesa na pružině. [28]

Přepodkládáme, že impedance povrchu rezonátoru je vyjádřena pomocí vzorce [8] :

$$z_1 = r_m + j[\omega m - \rho c \cot(kd)] \quad (3.12)$$

,kde  $k = 2\pi/\lambda$  je vlnové číslo,  $d$  je hloubka dutiny a  $m$  je akustická hmotnost uvnitř šterbiny,  $\omega$  je úhlová frekvence,  $\rho$  je hustota prostředí a  $c$  je rychlost zvuku v prostředí. Pro tento případ je prozatím zanedbaná přítomnost porézního materiálu v dutině. Aby výše popsany systém rezonoval, musí jeho imaginární část být rovna 0. Dalším předpokladem je, že velikost vlnové délky je daleko větší nežli hloubka dutiny, respektive  $kd \ll 1$ , což znamená  $\cot(kd) \rightarrow 1/kd$  a vede k vyjádření frekvence

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{md}} \quad (3.13)$$

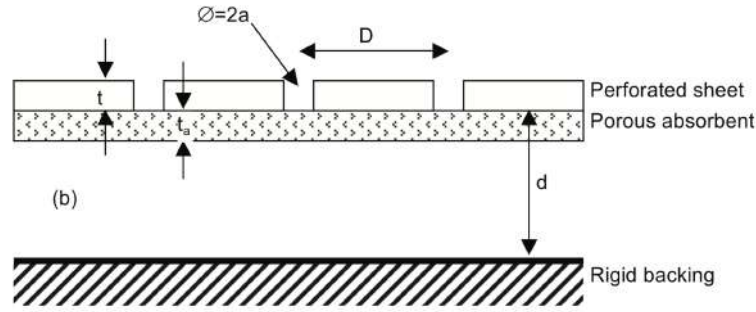
Pokud vyjádříme akustickou hmotnost v rovnici jako  $m = \rho D^2 t' / \pi a^2$ , kde  $t'$  je tloušťka perforované plochy dostáváme vyjádření

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{t'V}} \quad (3.14)$$

,kde  $S = \pi a^2$  a  $V = D^2 d$ . V praxi se často ještě využívá alternativní forma vyjádření pomocí činitele děrování  $\varepsilon$ , který dává do poměru plochu děr a plochu a průřez pomysleného objemu dutiny, tedy vyjádření rezonanční frekvence pomocí činitele bude následovné

$$\varepsilon = \frac{\pi a^2}{D^2}, \quad (3.15)$$

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon}{t'd}}. \quad (3.16)$$



Obr. 3.1: Konstrukce Helmholtzova rezonátoru s porézním materiálem.[8]

Další proměnná, která ovlivňuje rezonanční frekvenci, je koncová korekce  $\delta$ , která souvisí s geometrií děrování. Pomocí této proměnné lze vyjádřit hmotnost v rovnici 3.13

$$m = \frac{\rho}{\varepsilon} \left[ t + 2\delta a + \sqrt{\frac{8v}{\omega} \left( 1 + \frac{t}{2a} \right)} \right]. \quad (3.17)$$

### Membránový rezonátor

Membránový rezonátor může vycházet z rovnice 3.13 kdy je tato hmotnost vypočtena jako hmotnost na jednotce plochy, tedy

$$f = \frac{60}{\sqrt{md}}. \quad (3.18)$$

Při přítomnosti porézního materiálu uvnitř dutiny rovnici upravujeme do tvaru

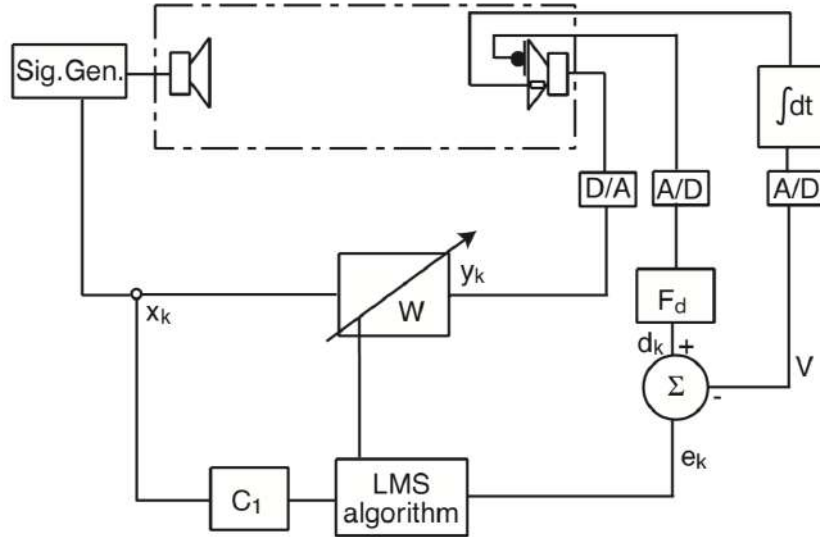
$$f = \frac{50}{\sqrt{md}}. \quad (3.19)$$

Predikce membránových rezonátorů pomocí těchto rovnic mají svá omezení a jsou často nepřesné. Vzhledem ke konstatní hmotnosti na plochu není možné například predikovat vyšší harmonické rezonančních módů.

### 3.3.2 Aktivní absorbéry

Aktivní metoda absorpce je další možností, jak dosáhnout efektivní absorpce nízkých kmitočtů. Tuto metodu tedy lze použít na redukci módů prostoru. Obtížná implementace a taktéž finanční stránka jsou důvodem malého výskytu této technologie v reálných podmínkách. Často se tyto principy využívají i k aktivní kontrole hluku.

Cox v knize [8] uvádí 2 typy aktivní kontroly. Prvním typem je "*feedforward active impedance control system*". Tento systém je buzen signálovým generátorem, který je připojen na primární zdroj zvuku (na diagramu vlevo). Mezi sekundární a primárním



Obr. 3.2: Příklad "feedforward active impedance control" systému.[8]

zdrojem zvuku se nechází prostor, což v případě tohoto konkrétní příkladu je trubice. Sekundární zdroj zvuku dostává předem známou informaci o impedanci této aktivní plochy (proto "feedforward"). LMS algoritmus zároveň ověřuje požadovanou hodnotu impedance pomocí údajů o akustické rychlosti. Akcelerometr miniaturních rozměrů připevněn k membráně dodává do systému údaje o akustické rychlosti. Je možné také použít mikrofonní techniku, pomocí dvou mikrofonů umístěných blízko sebe na ploše. Údaje o akustickém tlaku vstupují do filtru  $F_d$ , který je sám o sobě admitancí zvolené plochy a výsledkem je akustická rychlost označena jako  $d_k$ . LMS algoritmus má v sobě adaptivní filtr  $W$ , který sleduje chybový signál  $e_k$ , který je vypočten jako rozdíl dosažené a vypočtené akustické rychlosti na povrchu. Ke stanovení požadované hodnoty impedance je potřeba  $k$  kroků. Právě rychlost aktualizace  $\alpha$  určuje, zda systém konverguje k požadované hodnotě či nikoliv (viz. rovnice 3.20, kde  $x_k$  je vstupní signál filtru  $W$ )

$$W_{k+1} = W_k + 2\alpha e_k x_k. \quad (3.20)$$

### 3.3.3 Aktivní systémy kontroly

Příkladem aktivního systému kontroly je systém chameleon [13]. Tento systém používá subwoofrové jednotky s několika stupni volnosti, což umožňuje vyrovnat frekvenční charakteristiku přirozeně ovlivněnou interakcí s prostorem. Pro příklad stupeň volnosti bodového zdroje je 1, gradientního zdroje 2.

Funguje na principu přesného měření, díky nimž se vypočítá korekční filtr pro každý zdroj zvuku. Měří se impulsní odezva v tzv. cílových bodech, jejichž počet odpovídá stupni volnosti zdrojů zvuku. Po změření těchto filtrů se musí definovat

cílová charakteristika v každém bodě, což může představovat stejný průběh frekvenční charakteristiky, ale i rozdílný.

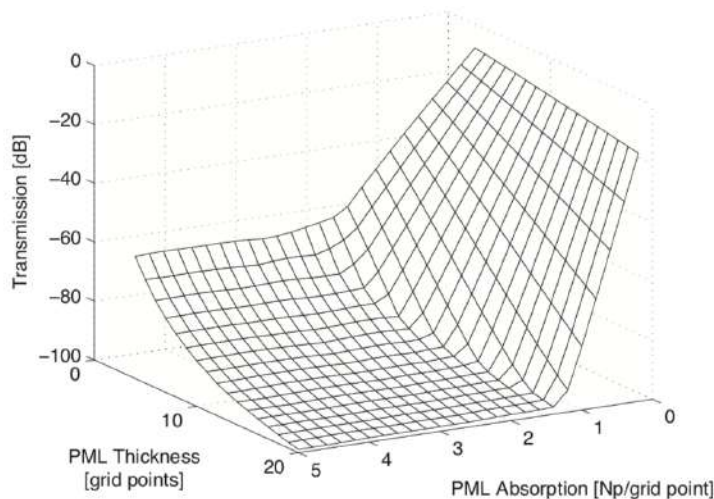
## 4 Modelování zvukového pole v prostředí Matlab

### 4.1 k-wave FDTD toolbox

V práci jsme se rozhodli k použití FDTD toolboxu k-wave, jehož autory jsou Bradley E. Treeby a B. T. Cox [26]. Z dostupného toolboxu v našich simulacích mimo jiné používáme funkci k výpočtu tlakového pole. Toolbox je rozšířen o celou řadu funkcí sloužících k analýze dat, případně definování zdrojů a jiné. V této podkapitole rozbereme základní definování vstupních dat a uvedeme základní informace.

#### 4.1.1 PML - perfectly matched layer

Jedním z akustických modelů je simulace ve volném poli bez odrazu. Při definování prostoru bez hranic by se v takovém případě musel výpočetní prostor zvýšit do rozměrů, které by byly výpočetně velmi náročné. Daleko jednodušší je řešení vytvořit hranice prostoru dokonale pohltivé a k tomuto účelu se definuje PML – tenká absorpční vrstva kolem definovaného prostoru. k-Wave využívá Berengerovu formulaci PML vrstvy. Principem je, že zvukové pole je se šíří v této vrstvě, avšak ztrácí normálovou složku k PML vrstvě. Tím dochází k útlumu právě ve směru zpět do prostoru. Detailněji je princip popsán v [26].



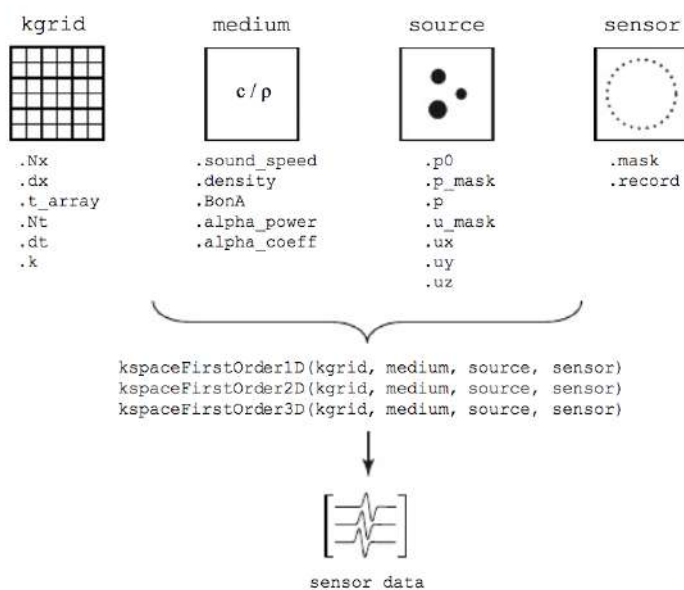
Obr. 4.1: Závislost absorpce PML vrstvy na její tloušťce a absorpci v Neperech.[8]

#### 4.1.2 Definování vstupů

Pro výpočet tlakového pole je potřeba definovat vstupy funkce. Tyto vstupy jsou v toolboxu definovány pomocí struktur. Struktura *kgrid* definuje rozměry samotné mřížky a její krok, časový krok  $dt$ , délku simulace a jiné. Struktura *medium* definuje



vlastnosti media – v našem případě vzduchu a stěn místnosti. Zdroj zvuku *source* definuje v našem případě jeden a více zdrojů. Struktura *sensor* definuje měřicí body v prostoru. [26]



Obr. 4.2: Definice vstupů.

Typ dat, které jsou výstupem simulace *sensor data*, závisí na definované veličině před simulací.

## 4.2 Implementace funkcí na simulaci zvukového pole na nízkých kmitočtech

Toolbox k-wave nemá vytvořené funkce pro simulace prostorové akustiky, jelikož je primárně určen pro výzkum v jiné oblasti akustiky. Je proto nutné vytvořit několik funkcí, které nám pomůžou při zobrazování a analýze výsledků. Taktéž je nutné ošetřit vstupní proměnné pro simulaci v rámci známých konvencí z hlediska sound system designu – tedy geometrická konfigurace zdrojů zvuku a příslušný processing, který se běžně využívá při nastavování zvukových systémů. Pro simulaci prostorové akustiky je třeba definovat odraz v souladu s absorpčním modelem, který využívá absorpční koeficient  $\alpha$ .

### 4.2.1 Definování média

Hlavními vstupy pro tvorbu struktury *medium* jsou rychlost zvuku a hustota prostředí. Tyto veličiny v práci definujeme pomocí funkce *makeMediumLayers3D*, která vytváří stěny definovaného prostoru. Aby na rozhraní prostředí vzduch/stěna nastal,

musí specifická akustická impedance (rov. 1.13) být menší nebo větší nežli 1. Z rovnice 1.11 vyjádříme odrazivý faktor jako závislost na vstupní hodnotě absorpčního koeficientu  $\alpha$

$$R = \sqrt{1 - \alpha} \quad (4.1)$$

dle [8] poté vyjádříme podíl impedance 2 médií – tedy vzduchu a zdi.

$$\frac{z_{wall}}{\rho c} = \frac{1 + R}{1 - R} \quad (4.2)$$

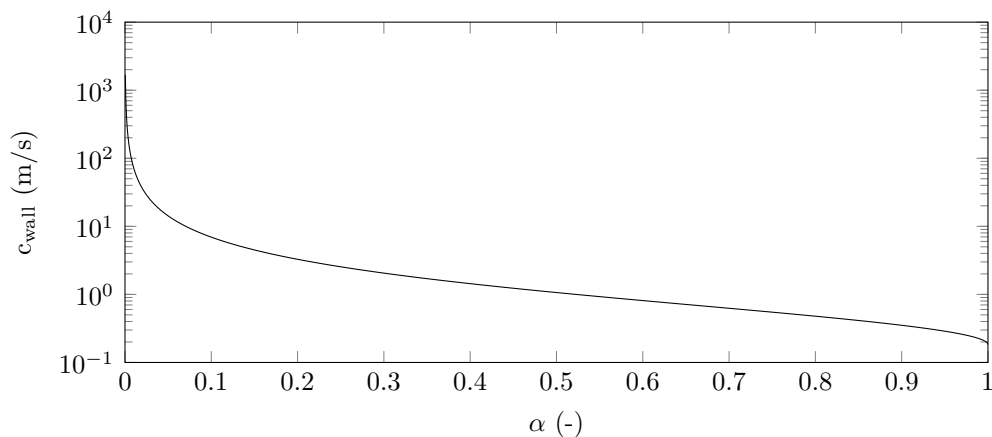
a po nahrazení  $R$  dle rovnice 4.1 dostáváme

$$\frac{z_{wall}}{\rho c} = \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha}}{1 - \sqrt{1 - \alpha}}. \quad (4.3)$$

V případě známé hustoty našeho materiálu zdi  $\rho_{wall}$  a hodnotu specifické akustické impedance  $\rho c$  vyjádříme proměnnou hodnotu rychlosti zvuku ve zdi  $c_{wall}$

$$c_{wall} = \frac{\rho c}{\rho_{wall}} \left( \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha}}{1 - \sqrt{1 - \alpha}} \right). \quad (4.4)$$

Hodnota rychlosti zvuku ve zdech se tedy mění v závislosti na voleném absorpčním koeficientu  $\alpha$  a na konstantních hodnotách  $\rho_{wall}$ ,  $\rho$  a  $c$ .

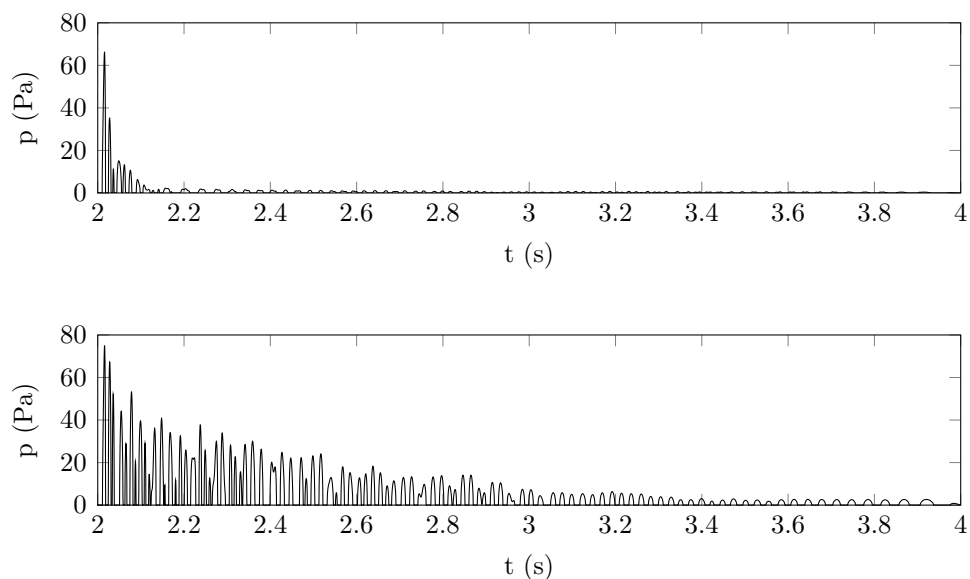


Obr. 4.3: Závislost rychlosti zvuku ve zdi při konstantní hustotě  $2300 \text{ kg/m}^3$  na koeficientu  $\alpha$ .

Pokud vytvoříme simulaci pro 2 různé případy  $\alpha = 0.1$  a  $\alpha = 0.9$  pozorujeme různou délku dozvuku v impulsové charakteristice prostoru, viz. graf ??.

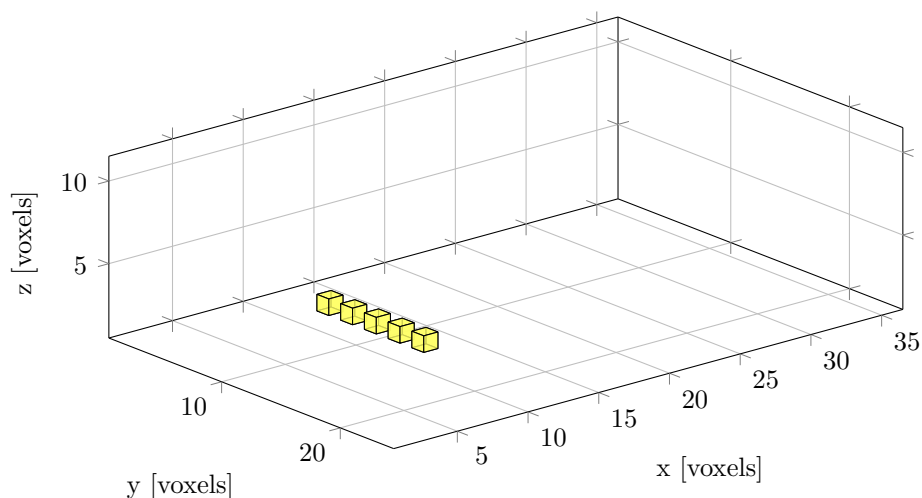
## 4.2.2 Definice zdrojů zvuku

K simulování subwooferových arrayů jsou použity funkce *arrayGeometry* a *arrayProcessing*. Geometrie je definována pomocí rozteče zdrojů, případně rozteče mezi



Obr. 4.4: Příklad výsledné impulsní odezvy při různých hodnotách absorpčního koeficientu.  $\alpha = 0.9$ (nahore);  $\alpha = 0.1$ (dole).

řadami zdrojů zvuku. Tyto informace jsou zapsány do matic. Hodnoty array processingu jako je zpoždění zdrojů, změna polarity je zapsáno do stejně rozměrných matic a společně definují vstupní signály jednotlivých zdrojů.



Obr. 4.5: Příklad umístění subwooferové arraye v místnosti. Střed řady zdrojů  $x=4\text{m}$ ,  $y=3\text{m}$ ,  $z=1,25\text{m}$ .

### 4.2.3 Další funkce

Mimo primární funkce, které nám definují prostor a v něm umístěny zdroj zvuku, je třeba pro analýzu definovat další rozšířené funkce. Z vypočítaného pole akustického tlaku v poslechové rovině(nebo prostoru) vycházejí funkce, které určují základní akustické veličiny:

- *analyzeImpResp* – Pomocí konvoluce vytvoří impulsní odezvu prostoru a dále ji analyzuje. Výstupem jsou charakteristiky jako frekvenční odezva, fázová odezva, impulsní odezva, Schroederův integrál a doba dozvuku.
- *analyzeMdSvMolLf* – Dle [11] analyzuje základní charakteristiku nelinearit v prostoru způsobené interakcí zdrojů nebo interakcí místnosti a zdroje.
- *getMapData* – Vytváří SPL zobrazení v poslechové rovině s krokem 6dB na barevný díl.

## 5 Kvantifikace vlivu vyzařování

### 5.1 Kvantifikace tonální konzistence

Tonální konzistence na rozsahu frekvencí, které hrají pouze subwoofery, sleduje konzistenci tonality. Tu můžeme specifikovat jako poměr mezi jednotlivými frekvencemi. Při konstantní tonalitě jsou zachovány tyto poměry mezi frekvencemi a rozdíl se limitně blíží 0.

Tonalitu můžeme zkoumat různými hodnotami – např. SV(spatial variance), který analyzuje tonalitu v rámci celého prostoru a vztahuje ji k průměrné hodnotě v daném prostoru. Taktéž změnu tonality napříč poslechovou rovinou můžeme definovat se vztahem k hodnotě na FOH pozici.

#### 5.1.1 Spatial variance

Pokud hodnotíme změnu tonality napříč prostorem mluvíme o tzv. prostorové odchylce (spatial variance)[10]. Vyjadřuje průměrné odchylky frekvenční charakteristiky napříč měřicími body. V práci budou měřicí body náležet poslechové rovině, ve které se nachází posluchači.

$$SV = \frac{1}{N_f} \sum_{i=f_{lo}}^{f_{hi}} \sqrt{\frac{1}{N_p - 1} \sum_{p=1}^{N_p} (L_p(p, i) - \overline{L_p(i)})^2} \quad (5.1)$$

,kde odchylka v  $dB$  je závislá na počtu frekvenčních vzorků  $N_f$  na frekvenčním rozsahu  $f_{lo}$  až  $f_{hi}$  a na počtu měřicích bodů  $N_p$  a závislých hodnotách v těchto bodech  $L_p(p, i)$  a  $\overline{L_p(p)}$ . Hodnota  $\overline{L_p(p)}$  je průměrná hodnota napříč všemi měřicími body a frekvenčními vzorky. Rozdíl  $L_p(p, i) - \overline{L_p(p)}$  popisuje rozdíl hodnot hladiny akustického tlaku v jednotlivých bodech. V práci jednak pracujeme s jednotkovou hodnotou SV ale i s grafickým vyjádřením těchto rozdílů v každém frekvenčním vzorku.)[10]

#### 5.1.2 Magnitude deviation

Při analýze frekvenční charakteristiky definujeme odchylku frekvenční charakteristiky (magnitude deviation MD). Zatímco prostorová odchylka SV nám udává celkové rozložení zvukové energie napříč poslechovou rovinou, u MD sledujeme odchylku frekvenční charakteristiky  $L_p(p, i)$  v daném bodě  $p$  od průměrné frekvenční charakteristiky  $L_p(i)$  ve všech bodech poslechové roviny.

$$MD = \sqrt{\frac{1}{N_f - 1} \sum_{i=f_{lo}}^{f_{hi}} (L_p(p, i) - \overline{L_p(i)})^2} \quad (5.2)$$

### 5.1.3 Publikum vs. FOH pozice

) V live-sound aplikacích je zvykem mít pozicíc zvukaře standartně na akustické ose subwooferů. Pozice FOH inženýra při této konfiguraci trpí tzv. "power alley", pokud systém vhodně neoptimalizujeme. To má za následek znatelně větší množství energie na nízkých frekvencích na FOH pozici nežli v dalších bodech auditoria. Z psychoakustického hlediska poté máme v dalších bodech prostoru tzv. "bass-light" mix na pozicích, které jsou mimo středovou osu. [10]

Stav, kdy bude nulová odchylka v SPL v celé poslechové rovině, nemůžeme v praxi předpokládat. Při použití "ground-based" systémů dochází k poklesu SPL v závislosti na vzdálenosti, což znemožňuje předpoklad podobného SPL v rámci poslechového prostoru. Při velkoformátových akcích tento rozdíl není tak zásadní, jelikož se bavíme o pokrytí např. 64m prostoru a platí, že mezi 1-2m od zdroje je útlum -6 dB, 1-4m -12 dB, 1-8m -18 dB, 1-16m -24 dB, 1-32m -32 dB, 1-64m -38 dB. Na ploše mezi 16m a 64m, což můžeme považovat za většinu auditoria, máme rozdíl v hlasitosti 12 dB. a mezi 32m a 64m, což je pořád polovina poslechového prostoru, je tento rozdíl 6 dB.

Průměrné SPL v rámci celé poslechové roviny definujeme jako průměrnou hodnotu všech měřicích bodů v rovině v závislosti na rozsahu frekvenčních vzorků  $i$ .

$$MOL = \frac{1}{N_f N_p} \sum_{i=f_b}^{f_{hi}} \sum_{p=1}^{N_p} L_p(p, i) \quad (5.3)$$

Tuto hodnotu poté porovnáváme s průměrnou hodnotou SPL  $L_{p,FOH}$  na pozici FOH a vyjadřujeme absolutní hodnotu rozdílu:

$$\Delta AUD = |L_{p,FOH} - MOL|. \quad (5.4)$$

## 5.2 Výkonová kvantifikace a efektivita

Pokud se jedná o optimalizaci subwooferových konfigurací z hlediska výkonu, porovnává se několik hledisek. V této práci má bodový zdroj SPL(RMS) hodnotu v 1m 120dB SPL. V reálném měření se bude jednat o použití subwooferu lacoustics SB18 s 138dB SPL(peak) s headroom hodnotou 18dB. Při použití v uzavřených prostorech budeme předpokládat teoretický nárůst oproti volnému poli o 9dB SPL. Teoretický nárůst dB při sčítání 2 a více zdrojů bude vypočítán pomocí rozdílů logaritmů. Např. součet 3 bodových zdrojů by v ideálním součtu činil  $20 * \log_{10}(120 * 3) - 20 * \log_{10}(120) = 9,5 \text{ dB}$ . Tyto hodnoty budou použity při určení cílové hodnoty na FOH pozici  $L_{p,tar}$  v podkapitole 5.2.1.

### 5.2.1 HR

Změna headroom hodnoty systému je udávána jako  $\Delta HR$ .

$$\Delta HR = L_{p,tar} - L_{p,foh} \quad (5.5)$$

Pokud hodnota  $\Delta HR$  klesne pod 0dB, pro výpočty se používá hodnota 0. Záporná hodnota taktéž indikuje překročení hodnoty SPL oproti cílové hodnotě. Za předpokladu 2 bodových zdrojů o hodnotě SPL(rms) 120 dB vypočítáme cílovou hodnotu  $L_{p,tar}$  v uzavřeném poli jako 120 dB + 6 dB + 9 dB = 135 dB. Tuto hodnotu musíme normalizovat podle poklesu hodnoty SPL v místě FOH. Ve vzdálenosti 4m od zdroje bude normalizační koeficient -12 dB. Tudíž předpokládaná hodnota  $L_{p,tar}$  při použití 2 bodových zdrojů v prostoru po normalizaci činí 123 dB.

Tato hodnota je v práci [10] používána především v podmínkách poloprostoru na otevřené louce, kdy je chování zdroje identické s volným polem. Tudíž předpokládaná teoretická hodnota je výpočetně jednoše proveditelná pomocí znalosti SPL zdroje, počtu zdrojů a vzdálenosti. V naší práci jsme museli zvolit uchopitelnou závislost mezi počtem zdrojů a právě hodnotou  $\Delta HR$ . Dle teoretického předpokladu by tato hodnota měla zůstat konstantní. Při odchylce tedy můžeme usuzovat případnou chybu v optimalizaci nízkých kmitočtů, která bude patrná i v dalších zkoumaných faktorech.

### 5.2.2 Array performace rating

Tento faktor vychází z předchozích koeficientů a váhuje je mezi sebou.

$$aPR = W_{SV} \left( 10^{\frac{-SV}{20}} \right) + W_{HR} \left( 10^{\frac{-\Delta HR}{20}} \right) + W_{aUD} \left( 10^{\frac{-\Delta aUD}{20}} \right) \quad (5.6)$$

Vztah mezi  $SV$ ,  $\Delta HR$  a  $\Delta aUD$  je váhován pomocí koeficientů  $W_{SV}$ ,  $W_{HR}$  a  $W_{aUD}$ , jejichž součet musí být roven 1. Jejich poměr však můžeme měnit dle významu jednotlivých faktorů. V [10] je použito 1/3 váhování. V naší práci je vliv  $\Delta HR$  upozaděn na hodnotu 2/12 a  $SV$  spolu s  $\Delta AUD$  mají váhu 5/12.

Hodnoty APR dosahují hodnot od 0 (nejhorší) 1 (nejlepší). Celkové rozdělení škály a její hodnocení je uvedeno v tabulce 5.1.

Grade	APR range
A	[0.80 – 1.00]
B	[0.65 – 0.80)
C	[0.50 – 0.65)
D	[0.35 – 0.50)
F	[0.00 – 0.35)

Obr. 5.1: APR stupnice hodnocení.[10]

## 5.3 Kvantifikace vyzařování pomocí FAR a AR

Dalším typem kvantifikace, který budeme využívat, vychází z vyzařovací charakteristiky zdrojů. Příklady jsou uvedeny dříve v kapitole 2.3. Vyzařování můžeme popisovat dle [19] pomocí AR a FAR. Jelikož se práce věnuje situacím v uzavřených prostorech, je pro nás důležitý i předozadní útlum, který je zahrnutý pouze v koeficientu AR. Proto pro naše sledované vlastnosti bude zásadní.

Tyto koeficienty však lze velmi snadno vypočítat v případě, kdy se jedná o simulaci ve volném poli. V případě simulace odrazů nelze prakticky najít charakteristický obrazec, z něhož by bylo možné tyto hodnoty vyhodnotit. V simulacích proto budou nejprve konfigurace vyhodnoceny ve volném poli právě z důvodu získání těchto koeficientů.



## 6 Optimalizace módů prostoru

Pokusy o optimalizaci módů v prostoru už se objevují od 60 let minulého století. V článku [29] se věnuje optimalizaci pomocí jediného subwooferu. Typům optimalizace módů jsme věnovali podkapitulu 3.3. Existuje množství metod, z nichž každá má svoji specifikaci a efektivitu. Současným trendem je aktivní optimalizace, kterou publikuje Hill v [14].

Tato práce nedovoluje prakticky prozkoumat aktivní optimalizaci např. pomocí systému „chameleon“ [14] z hlediska komplexnosti metody a jejím specifickým nástrojům. Dále můžeme vyloučit i pasivní absorpci pomocí rezonančních prvků z důvodu finanční nákladů na realizaci. V reálném prostoru, kde budeme simulace ověřovat, jsou rezonanční prvky navíc už nainstalovány.

Optimalizace tedy bude prováděna především v rámci změny pozice zdroje zvuku v místnosti a processingu jednotlivých zdrojů. K reálnému měření máme k dispozici subwoofery od firmy Lacoustics. Tyto subwoofery jsou navrženy na „live-sound“ aplikaci a u simulací a reálného měření budeme tento faktor respektovat a vycházet ze základních pravidel této oblasti [19], [9]. Důležitým aspektem při „live-sound“ aplikacích je výkonová optimalizace zvukových zdrojů [10].

V této kapitole se budeme zaměřovat na simplifikaci jevů, které jsou rozebírány v [2],[1],[25],[11], na jejichž základě budeme demonstrovat popsání způsoby optimalizace a vytvoříme si předpoklady vhodných konfigurací na redukci dopadu módů místnosti na prostorvé odchylky ve frekvenční charakteristice. Použijeme k tomu FDTD simulaci, konkrétně funkci pro 1D simulaci z [26].

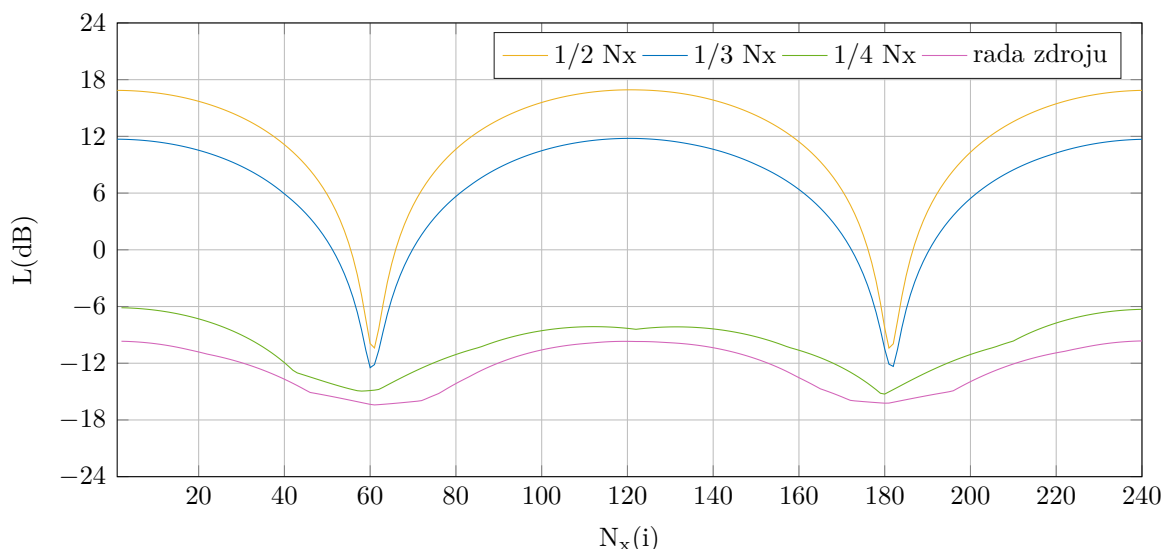
### 6.1 Pozice zdroje zvuku

Jednou z možností jak snížit odchylky je zvolením vhodné pozice zdrojů. V [11] můžeme sledovat několik konfigurací a jejich vliv na sledované koeficienty. Jedním z principů redukce je umístění zdroje do místa, kde má být teoretické minimum akustického tlaku – tedy do nódů [25]. Posun zdroje blíže nebo dál od tohoto bodu změni velikost amplitudy výsledných módů. Tento princip má však jednu nevýhodu – mód vyššího řádu má v bodě vysokou úroveň akustického tlaku a tedy vytváří vysokou amplitudu výsledného módu

V případě více zdrojů se stejným signálem je můžeme umístit ke zdi na každou stranu. Tato konfigurace mód redukuje [25],[1]. Pokud rozvrhneme zdroje zvuku po celé šířce strany místnosti, můžeme očekávat kombinaci předchozích vlastností.

V následujícím grafu je demonstrována 1D simulace maximálního tlaku v závislosti na poloze zdroje zvuku. Zdroj je buzen na frekvenci módu druhého řádu. Lze si povšimnout výrazné redukce módu při umístění zdroje do nódu ( $1/4N_x$ ). Změna

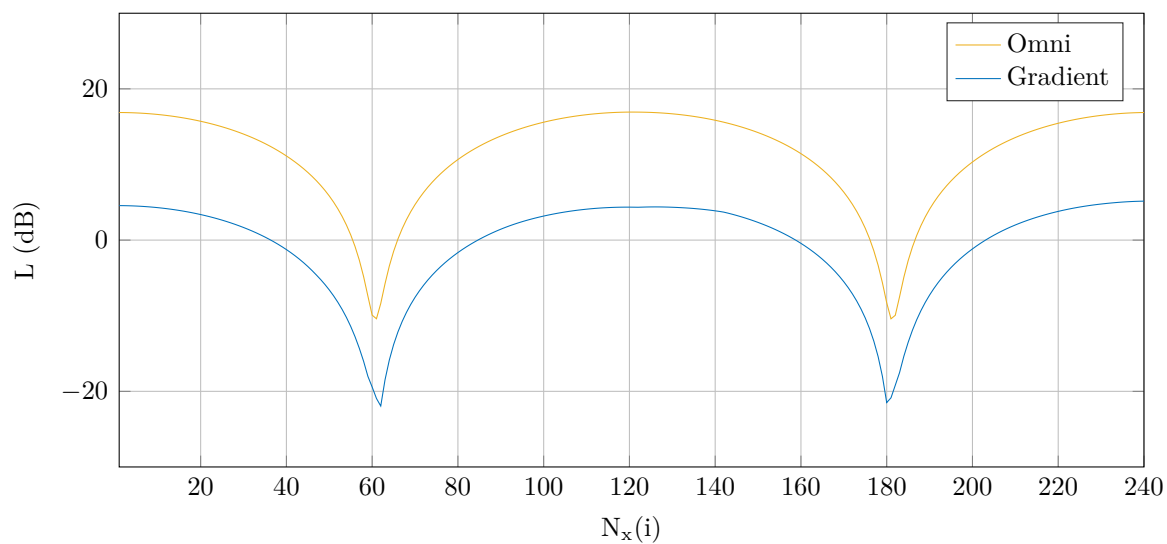
je 12 dB v pozici s maximální výchylkou, naopak v místě s nejmenším akustickým tlakem už dochází k redukci o 3 dB – tedy nastala redukce SV, nikoliv pouze redukce maximální hodnoty.



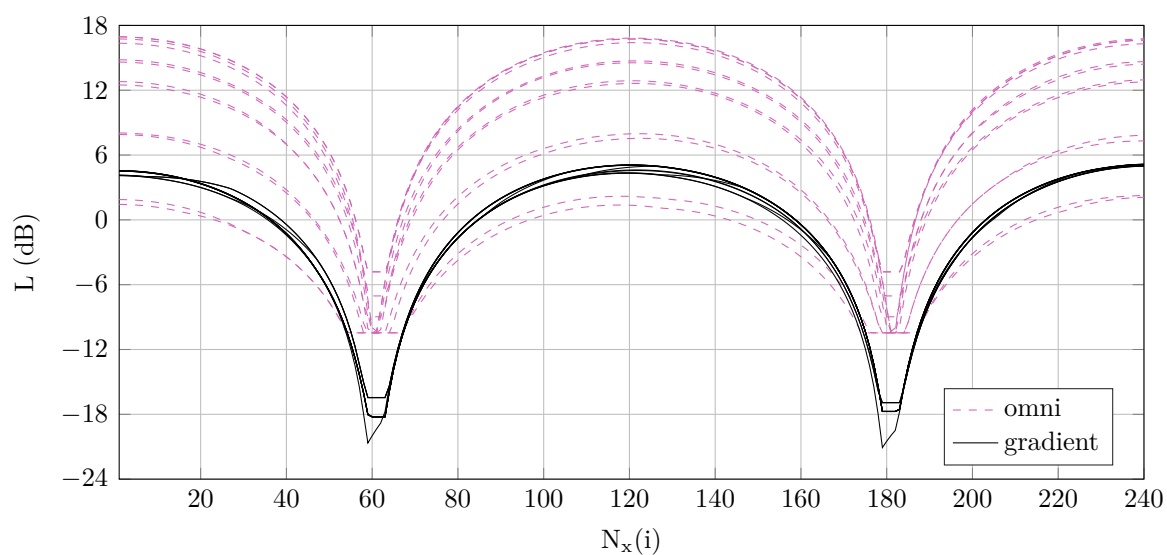
Obr. 6.1: Závislost maximální hladiny akustického tlaku na poloze zdrojů.

## 6.2 Excitace stěn a směrové vyzařování zdrojů

Excitování stěn, tedy intenzita vyzařované zvukové energie dopadající na stěny uzavřeného prostoru, je jedním ze způsobů optimalizace módů v prostoru, což je podrobněji sledováno v [2], [24]. Na následujícím příkladu je simulována změna buzení módu místnosti v závislosti na vyzařování zdroje. Zvolili jsme gradientní (in-line) array [21], [3] – 0,8 m vzdálenost mezi zdroji, kdy jeden ze dvojice zdrojů zpožděn o 2,33 ms s otočenou polaritou. Ve volném prostoru probíhá součet zdrojů zvuku v jednom směru, zatímco v dalším směru probíhá odečet (podkapitola 7.1). V uzavřeném prostoru se projevuje gradientní charakteristika snížením amplitudy módu, zatímco změna v rámci maxim a minim akustického tlaku v rámci vybuzeného módu se téměř nemění v závislosti na konfiguraci. Můžeme pozorovat snížení rozdílů maxim a minim o 2 dB v prostoru, kde má docházet k odečtu signálu. Změna v excitaci módu je 12 dB.



Obr. 6.2: Porovnání gradientního a omni zdroje na modální frekvenci.



Obr. 6.3: Porovnání gradientního a omni zdroje na modální frekvenci pro více míst.

## 7 Predikce a reálné měření

Z hlediska optimalizace zvukového pole na nízkých kmitočtech je v přechozích kapitolách popsáno několik variant. Experimentálně budeme ověřovat kombinaci fyzického umístění zdroje a příslušného nastavení DSP. Důvodem k tomuto kroku je především fakt, že tato metoda nepotřebuje vývoj speciálního processingu (jako např. chameleon). Odlišnost experimentálního zaměření této práce oproti pracím [2] [24] je především jeho live-sound aplikace, která je blíže zkoumaná např. Hillem v pracích [10][11][12][14]. V práci bude v reálné měření použito 5 kusů subwooferů L-acoustics SB18 [18], které jsou navrženy na live-sound aplikace.

Předpokladem úspěšné optimalizace subwooferů je jejich rovnoměrná distribuce napříč celou poslechovou rovinou. To je základem správné optimalizace subwooferů, kdy se k tomuto požadavku ještě přidává další nutná podmínka a to je stejný fázový průběh na spektrálním crossoveru s hlavním stereopárem. Tento důležitý faktor nám neumožňuje umísťovat subwoofery do různých bodů v prostoru za účelem vyhlazení kmitočtové charakteristiky (jak je tomu v [?],) jelikož by se zde projevovalo různé skupinové zpoždění vzhledem ke zpoždění hlavního stereopáru. Tím bychom zvýšili SV na frekvencích kolem crossoveru napříč celým prostorem, jelikož by nastaly součty a odečty v závislosti právě na skupinovém zpoždění. Zcela jiný případ by byl, pokud by tyto systémy fungovaly separátně. Tohle je základní předpoklad našeho experimentu – je nutné umístit subwoofery do prostoru poblíž hlavního stereopáru.

### 7.1 Gradientní řada zdrojů

Jednou ze sledovaných konfigurací je gradientní (in-line) array (viz. ), která vytváří předozadní útlum. Abychom mohli rozhodnout o dopadu vyzařování na vybuzení jednotlivých módů, je třeba si zvolit kritéria, dle kterých budeme chování jednotlivých konfigurací hodnotit.

Základními faktory jsou odchylky SV a MD. SV je považována za hlavní hodnotící kritérium při zkoumání frekvenční charakteristiky. Abychom správně analyzovali vliv konfigurace na módy v místnosti, je třeba se zaměřit na okolí modálních frekvencí. Z modálních frekvencí budeme analyzovat axiální módy, které se promítají do výsledného zvlnění frekvenční charakteristiky nejvíce [11]. Charakteristiku poté značně ovlivňují i tangenciální a šikmé módy, které interferují společně s axiálními módy a dostáváme výsledné módy. Z hlediska vnímání módů jsou však axiální módy nejvíce výrazné.

V této části práce bude porovnávat simulace a reálné měření. V FDTD simulaci volíme rozlišení mřížky  $dx=0,455\text{m}$ ,  $dy=0,35\text{m}$  a  $dz=0,44\text{m}$ . Pro porovnání je to 2x vyšší rozlišení nežli je volena mřížka při reálném měření. Analýza však probíhá

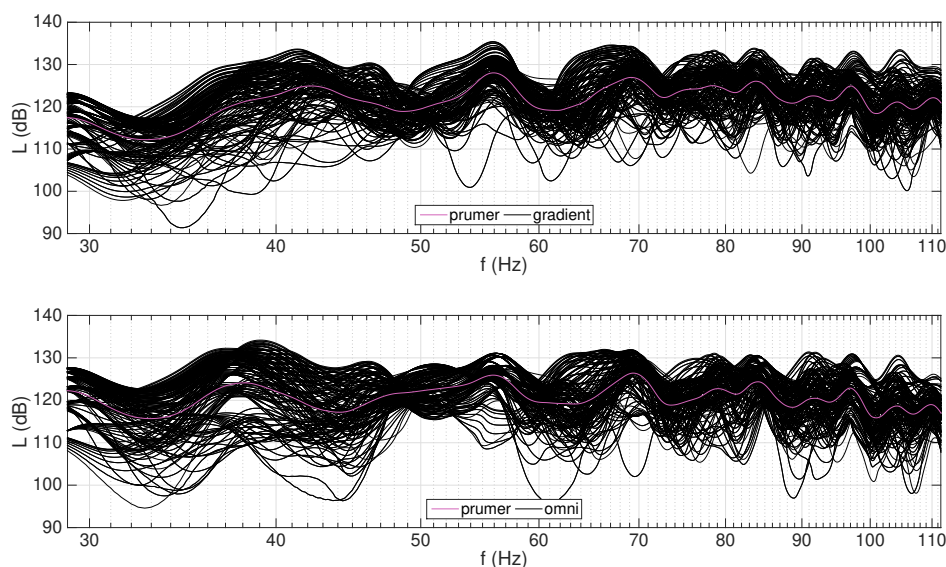
na stejné ploše poslechové roviny. Primárními hodnotami budou simulované data, na kterých bude vliv na frekvenční charakteristiku jednotlivých konfigurací patrnější díky simulaci v pravoúhlé místnosti. V reálném měření hodnotíme prostor, který má spoustu nelinearit, včetně dvou větších průchozů a 3 sekcí Helmholtzových rezonátorů. Záměrem experimentu však není analýza rozdílů mezi simulovanými výsledky a reálným měřením.

### 7.1.1 FDTD simulace

První část experimentu je o analyzování rozdílů mezi gradientní a všesměrovou (omni) charakteristikou. Z 5 subwooferů jsme vytvořili gradientní array s 3 subwoofery ve přední řadě a 2 subwoofery v zadní řadě se vzdáleností 0,9 m a roztečí uvnitř řady 1,05 m (viz. příloha A.1) [3]. Tato konfigurace byla porovnávána se všesměrovým vyzařováním o počtu 3 subwooferů. Tedy nechali jsme v přední řadě stejnou konfiguraci, jen zadní řadu jsme přidávali či odstraňovali v závislosti na konfiguraci.

#### Frekvenční charakteristika

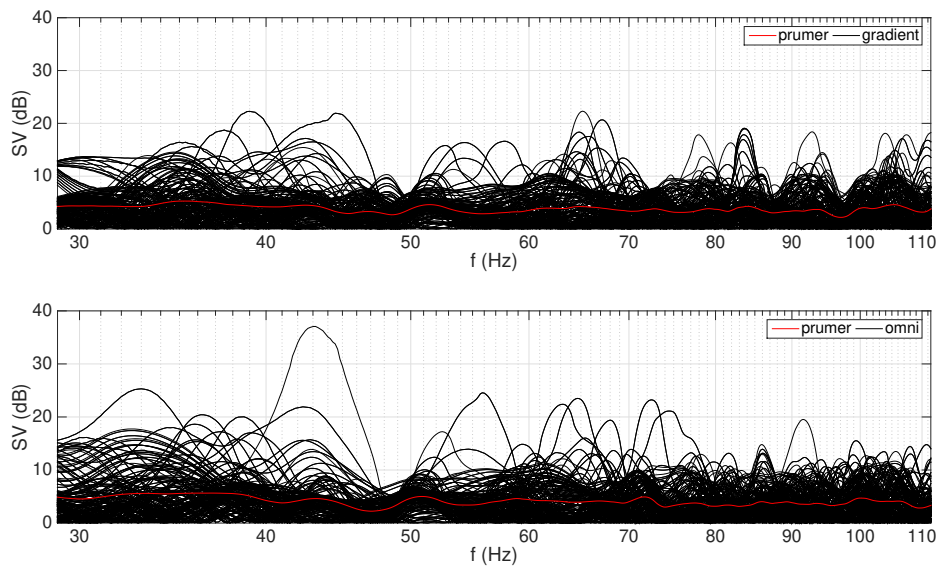
Ve frekvenční charakteristice 8.3 můžeme na první pohled několik změn. Tou nejvýraznější je rozdíl zvlnění pod 50 Hz. Taktéž můžeme pozorovat nárůst v hladině akustického tlaku u gradientní konfigurace, která má o 2 zdroje více, tzn. teoretický součet by měl odpovídat lineárnímu navýšení na  $5/3$ , což je 4,5 dB [19].



Obr. 7.1: Frekvenční charakteristika gradientní (nahore) a omni (dole) konfigurace.

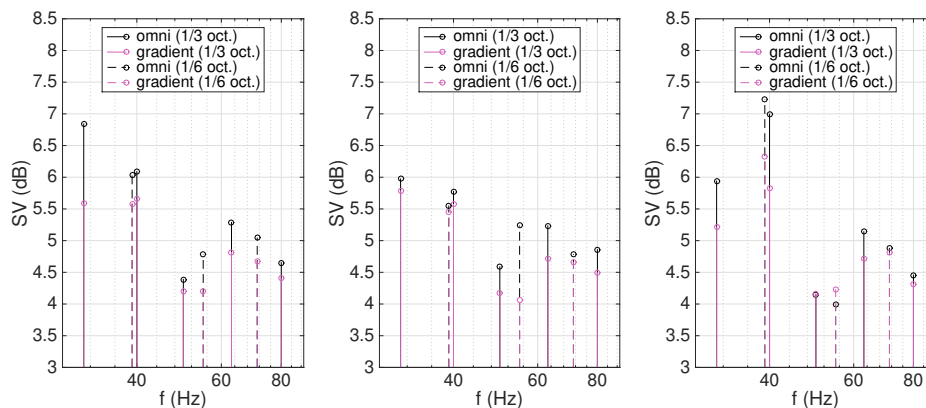
## Spatial variance

Podrobnější náhled nám dá SV. Ten můžeme vyjádřit buďto pomocí jediného čísla, kdy vytvoříme sumu všech odchylek a nebo můžeme separovat jednotlivé frekvence a pro ně vyhodnotit průměrnou odchylku. V grafu 7.2 jsou zobrazeny odchylky od průměrné hodnoty v závislosti na místě v prostoru. Při gradientní konfiguraci lze sledovat redukci maximálních odchylek a maximální odchylky se oproti omni konfiguraci značně snižují.



Obr. 7.2: Frekvenční charakteristiky gradientní a omni konfigurace vyhodnocené pomocí FDTD. Pozice rvní řady konfigurace  $X = 3,64$  m

Pokud vypočítáme průměrné odchylky na frekvenčních rozmezích 1/3 oktávy, můžeme kvantifikovat podrobněji chování arraye. Na obrázku 7.9 jsou zobrazeny 3 stejné konfigurace s různou hodnotou souřadnice  $X$  dané místnosti. Změny jsou patrné u všech konfigurací a dochází ke zlepšení při použití gradientu.



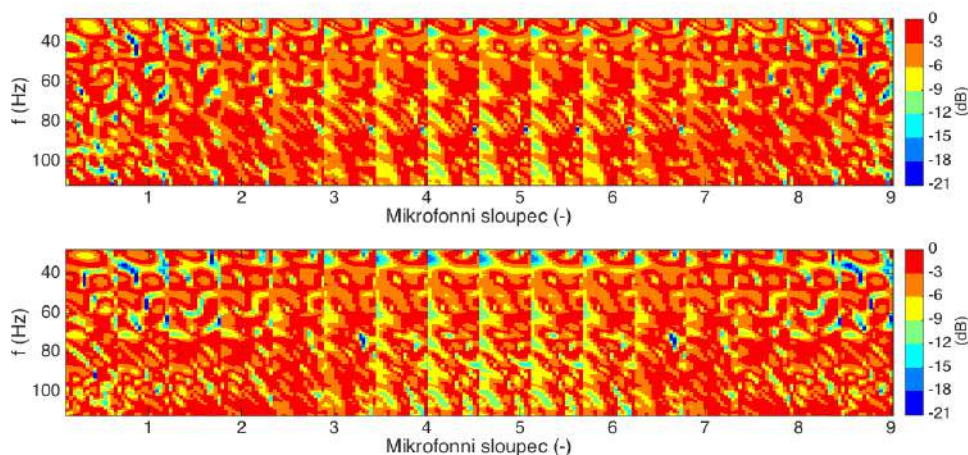
Obr. 7.3:  $X = 3,64$  m (vlevo),  $X = 4,1$  m (uprostřed),  $X = 2,4$  m (vpravo).

V následující tabulce máme shrnutí všech konfigurací, kdy u každé hodnotíme koeficienty SV, APR a dále pak určujeme poměrové zastoupení frekvenčních vzorků na intervalech 0 až 6 dB, 6 až 12 dB, 12 až 18 dB. Vyjádření poměry dostáváme poněkud lepší představu o tom, na jaké ploše v prostoru splňují alespoň některé pásma dané intervalové rozmezí. U gradientu se

	$SV$ (dB)	$APR$ (-)	$AUD$ (dB)	$SV_{0-6dB}$ (-)	$SV_{6-12dB}$ (-)
<b>Omni 1</b>	5,14	0,69	1,64	0,667	0,286
<b>Grad 1</b>	4,76	0,708	1,51	0,701	0,256
<b>Omni 2</b>	5,21	0,701	1,372	0,671	0,281
<b>Grad 2</b>	4,79	0,686	1,96	0,706	0,251
<b>Omni 3</b>	5,1	0,751	0,473	0,701	0,269
<b>Grad 3</b>	4,72	0,765	0,437	0,715	0,251

Tab. 7.1: Kvantifikace jednotlivých gradientních nebo omni konfigurací (FDTD).

Grafické vyjádření poměrového zastoupení v jednotlivých intervalech je v grafu 7.5, kde můžeme sledovat tyto intervaly po krocích 3 dB. Převaha červené barvy u gradientní konfigurace várazanější

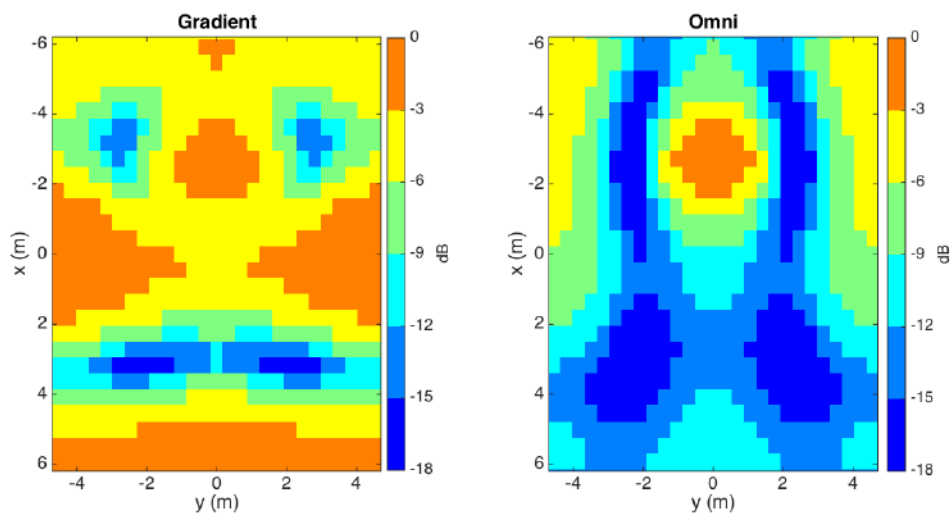


Obr. 7.4: Normalizovaný SV průběh závislý na frekvenčním vzorku a na mikrofonním bodě. Znázorněno zleva doprava (z pohledu FOH) s krokem 3 dB. Gradient (nahore), omni (dole).

## SPL rozložení

Výrazné zlepšení SV na třetinooktávovém pásmu o střední frekvenci 31 Hz můžeme demonstrovat na zobrazení grafu s rozložením SPL. Tento graf má krok 3dB, což je standardní krokování u většiny komerčních softwarů [17], [20], [7]. Můžeme tedy nahlédnout na výsledky i z geometrického hlediska, nikoliv pouze pomocí aproximace ve statistických hodnotách odečtených z frekvenční charakteristiky.

SPL rozložení v dalších 1/3 oktávových pásmech jsou zobrazeny v grafu v příloze .



Obr. 7.5: SPL rozložení pro 31 Hz.

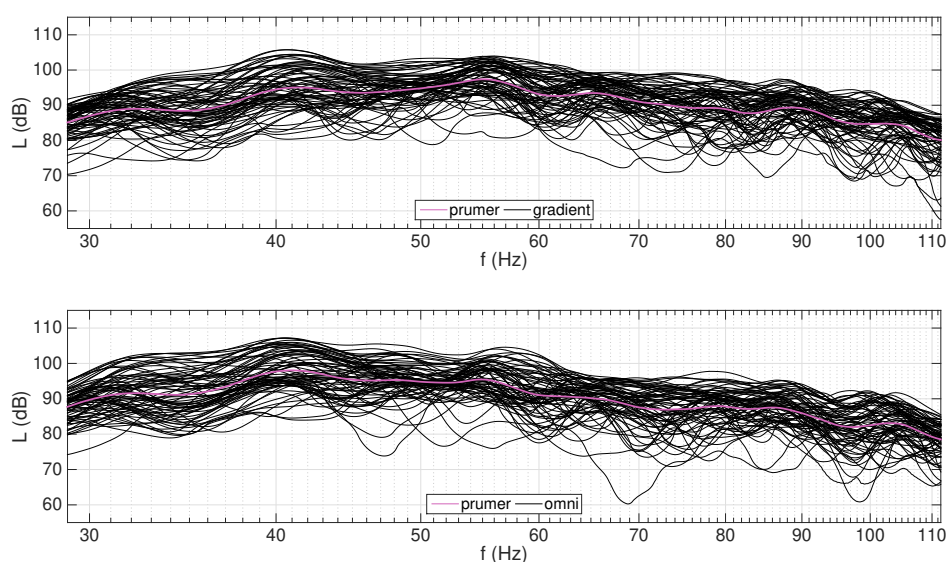


### 7.1.2 Reálné měření

V reálném měření gradientní konfigurace dosáhly taktéž výrazně lepších výsledků ve srovnání s omni konfiguracemi. Nicméně změny jsou mnohem méně rozpoznatelné. Obecně v reálném měření můžeme vždy očekávat nelineární chování systému, už z toho důvodu, že jsou zde aspekty, které nedokážeme nasimulovat.

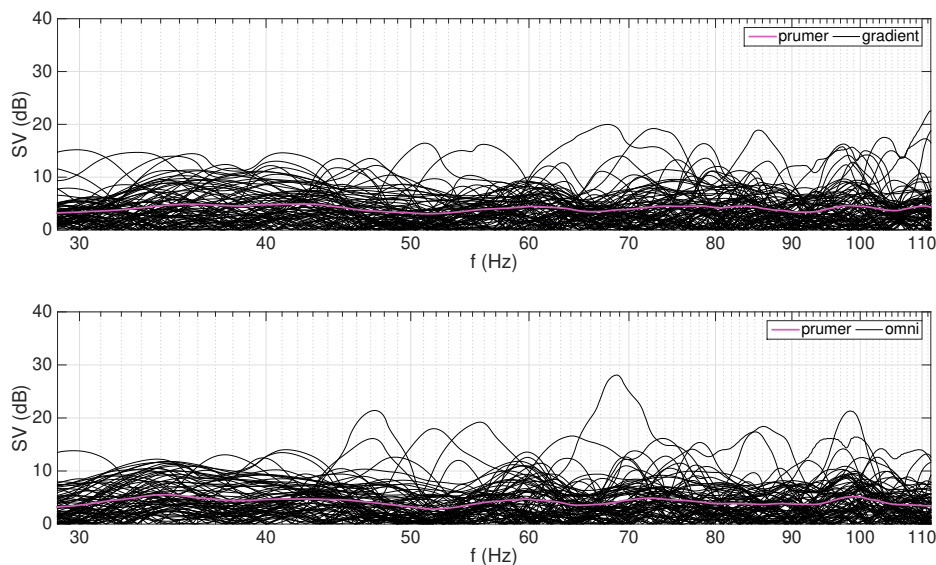
#### Frekvenční charakteristika a spatial variance

Ve frekvenční charakteristice vidíme rozdíl oproti simulovaným datům. Patrné je především nedokonalý součet, kdy nedostáváme tak velký nárůst v hladině akustického tlaku jako tomu bylo u simulací. Co se týká rozdílů mezi omni a gradientem, i zde můžeme sledovat zlepšení především na frekvenci kolem 31 Hz, stejně tak jako zlepšení SV v celé kmitočtové oblasti (viz. graf 7.7). Tohle chování je tedy společné pro simulaci i měření.



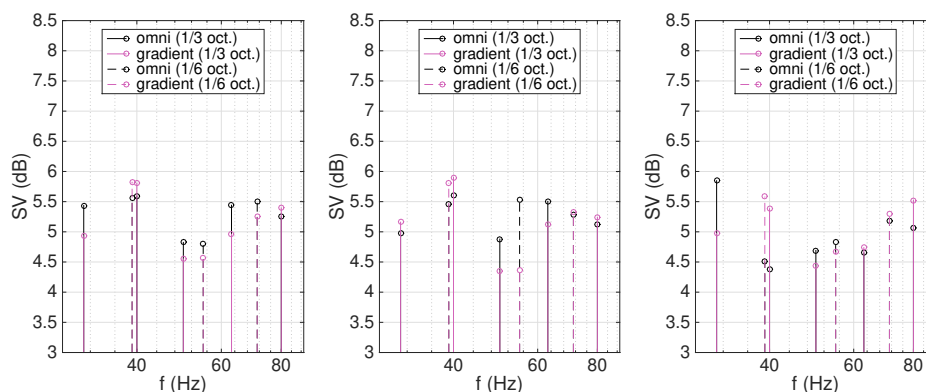
Obr. 7.6: Naměřená frekvenční charakteristika gradientní a omni konfigurace.

Redukce maximálních hodnot SV napříč frekvenčními vzorky je u gradientní arraye splněna až na kmitočty pod hranicí 35 Hz. Po touhle hranicí jsou měřicí body, které se vyznačují vyšší odchylkou



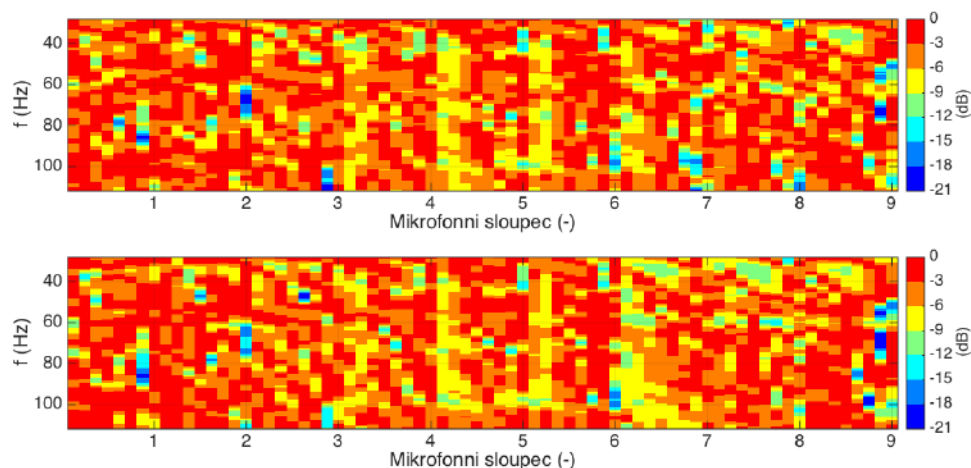
Obr. 7.7: Spatial variance reálného měření gradientní a omni konfigurace.

Pokud se zaměříme na výsledky všech 3 gradientních poloh na ose X (graf 7.8), u hodnot SV nemůžeme najít pravidlo napříč všemi pásmy, jelikož se hodnoty liší v závislosti na konfiguraci i na frekvenčním pásmu. V predikovaných výsledcích byla SV ve všech zkoumaných pásmech menší u gradientní konfigurace. V reálném měření máme obecně zhoršení na třetinooktávovém pásmu 40 Hz (to stejné platí pro šestinooktávové pásmo). Tento jev je důvodem k zamyšlení především z toho důvodu, že na zadní stěně místnosti naladěn rezonátor na frekvenci 41 Hz s šířkou pásma 1/2 oktávy.



Obr. 7.8: SV hodnoty pro jednotlivá frekvenční pásma.

Na následujícím grafu vidíme rozíly ve spatial variance, kdy u gradientní charakteristiky, kdy dochází k výraznému zlepšení. Pokud vyjádříme hodnotu pomocí poměrů vzorků v jednotlivých intervalech, pro 6 dB interval se jedná o 5% navýšení frekvenčních vzorků, které náleží intervalu 6 dB.



Obr. 7.9: Normalizovaná SV průběh závislý na frekvenčním vzorku a na mikrofonním bodě. Znázorněno zleva doprava (z pohledu FOH) s krokem 3 dB. Gradient (nahore), omni (dole).

Zatímco průměrná hodnota SV je při všech 3 testovaných polohách neurčitá, jelikož nám nesepraruje výrazně lepší konfiguraci, do APR se už promítá i další faktor a tím je rozdíl v hladinách akustického tlaku mezi FOH pozicí a zbytkem poslechové roviny. Ani APR však nedává jednoznačné informace k rozhodnutí o vhodnosti konfigurace.

	$SV(dB)$	$APR(-)$	$AUD(dB)$	$SV_{0-6dB} (-)$	$SV_{6-12dB} (-)$
<b>Omni 1</b>	5,25	0,67	1,99	0,594	0,302
<b>Grad 1</b>	5,16	0,692	1,58	0,64	0,292
<b>Omni 2</b>	5,22	0,727	0,838	0,593	0,323
<b>Grad 2</b>	5,16	0,667	2,13	0,648	0,289
<b>Omni 3</b>	4,94	0,708	1,4	0,532	0,343
<b>Grad 3</b>	5,1	0,768	0,166	0,604	0,316

Tab. 7.2: Kvantifikace jednotlivých gradientních nebo omni konfigurací (měření).

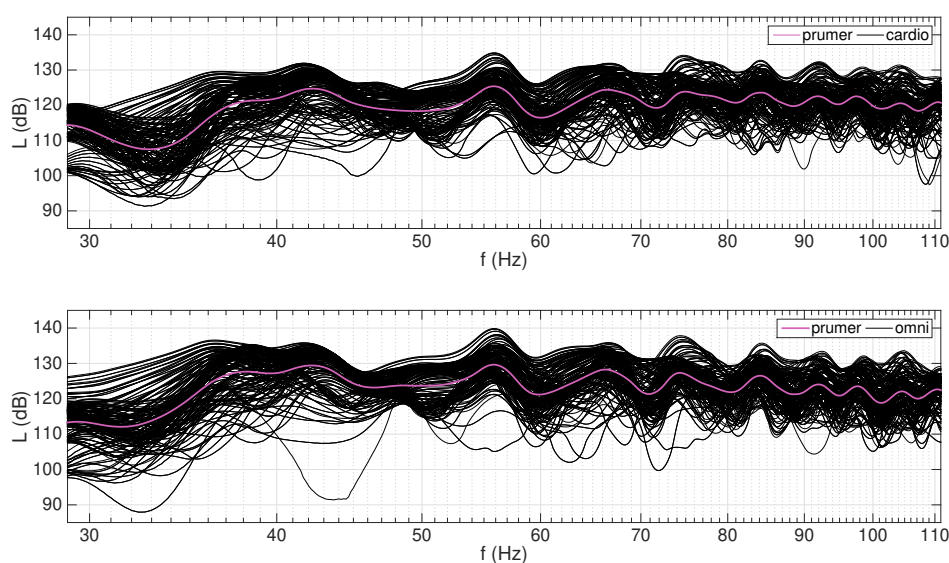
## 7.2 Kardioidní řada zdrojů

[t] Kardioidní zdroje jsou obdobou gradientní in-line konfigurace s tím rozdílem, že jsou seřazeny v jedné řadě. V našem případě testujeme 3 zdroje s roztečí 1,05 m. Prostřední zdroj je otočený o  $180^\circ$  a pomocí DSP zpožděný o 3 ms s otočenou polaritou. Výsledná charakteristika je kardioidní (viz. A.2).

### 7.2.1 FDTD simulace

#### Frekvenční charakteristika

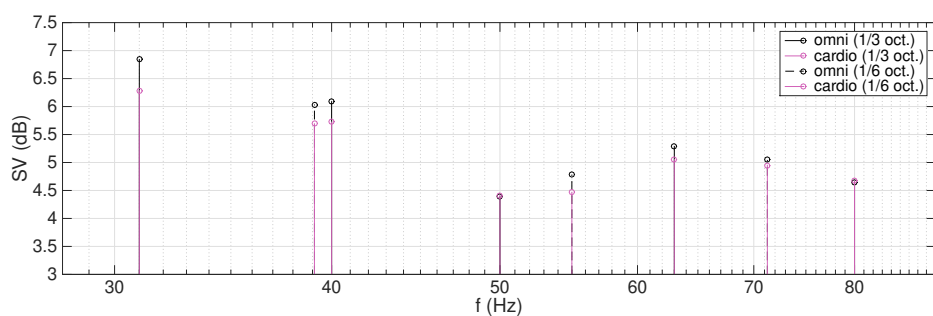
Ve frekvenční oblasti můžeme pozorovat podobně jako u gradientní arraye výrazné zlepšení na pásme pod 40 Hz. Zakřivení v oblasti 55 Hz představuje taktéž zlepšení u kardioidní konfigurace. Z hlediska výsledného hladiny akustického tlaku však efektivita arraye klesá, což je patrné na průběhu všech křivek. To je dáno především nedokonalým součtem před arrayí, kdy za cenu lepšího předozadního útlumu si snižujeme hodnotu akustického tlaku.



Obr. 7.10: Frekvenční charakteristiky kardioidní a omni konfigurace vyhodnocené pomocí FDTD.

## Spatial variance

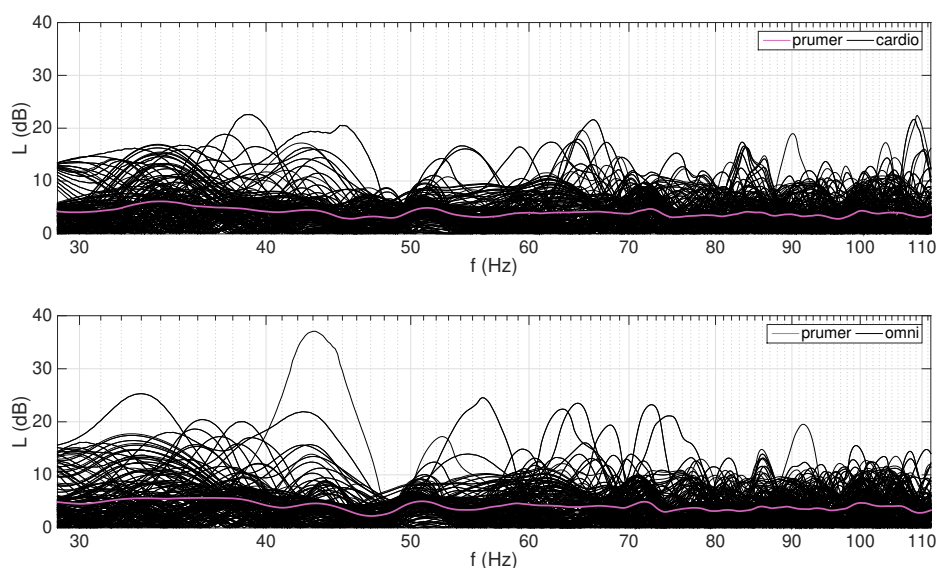
Z analýzy SV v jednotlivých frekvenčních vzorcích můžeme sledovat snížení maximálních výchylek. Dochází ke zlepšení celkové variance SV (viz. tabulka 7.3) a poměrové zastoupení v pásmu 0 až 6 dB se taktéž zlepšuje. Zhoršení naopak nastává u APR, kde se promítá jednak SV ale dále rozdíl mezi průměrnou hladinou napříč poslechovou rovinou a místem zvukaře.



Obr. 7.11: Odchylky SV v 1/3 oktávových a 1/6 oktávových pásmech.

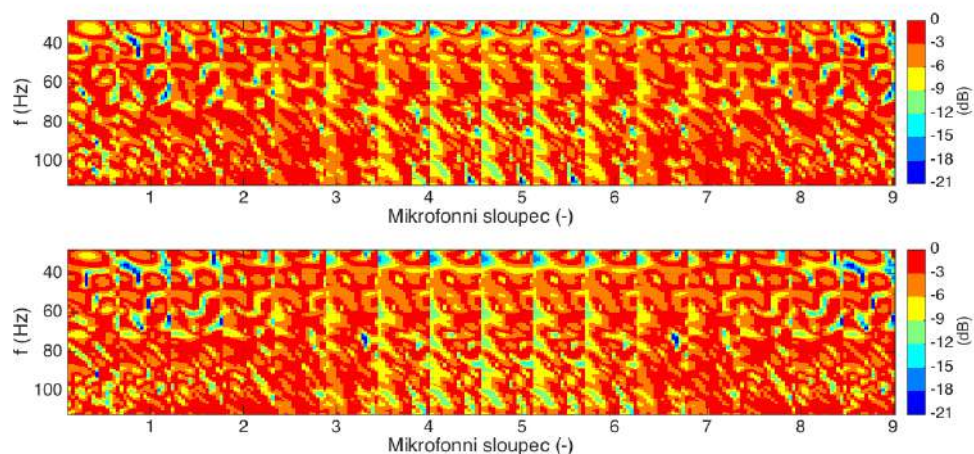
	<i>SV</i> (dB)	<i>APR</i> (-)	<i>AUD</i> (dB)	<i>SV</i> <sub>0-6dB</sub> (-)	<i>SV</i> <sub>6-12dB</sub> (-)
<b>Omni</b>	5,14	0,69	1,64	0,667	0,286
<b>Cardio</b>	4,97	0,637	2,97	0,696	0,259

Tab. 7.3: Kvantifikace jednotlivých koeficientu u kardiodní a omni konfigurace.



Obr. 7.12: SV pro jednotlivé mikrofonní body.

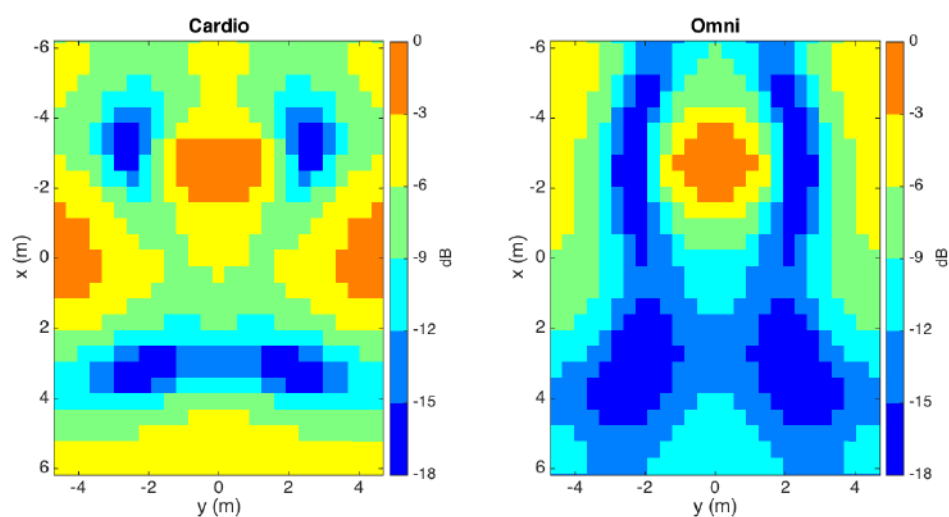
Oproti gradientnímu vyzařování (viz. 7.5) zde není tak patrné zlepšení v barevném grafickém zobrazení SV. Obrazce jsou téměř identické s mírnými změnami v pásmu kolem 30 až 40 Hz.



Obr. 7.13: Průběh SV pro různé mikrofonní body. Gradient nahoře, omni dole.

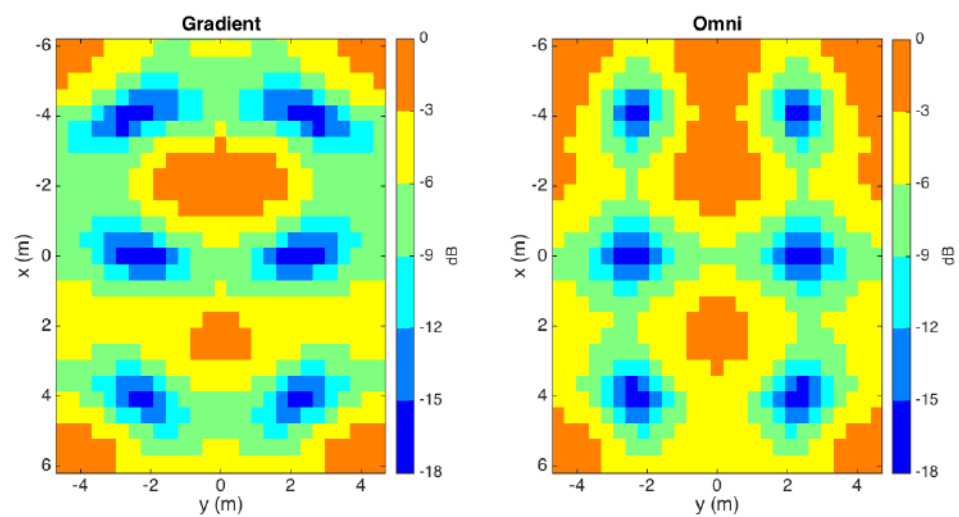
### SPL rozložení

SPL rozložení je podobně jako při gradientní konfiguraci zlepšeno na 1/3 oktávovém pásmu o střední frekvenci 31 Hz. Zde má předozadní útlum prokazatelné účinky na distribuci tohoto pásma.



Obr. 7.14: Rozložení SPL na pásmu 31 Hz (1/3 oktávy).

O 1/3 oktávy vyšší pásmo však takový efekt nemá, což můžeme vidět na následujícím grafu.



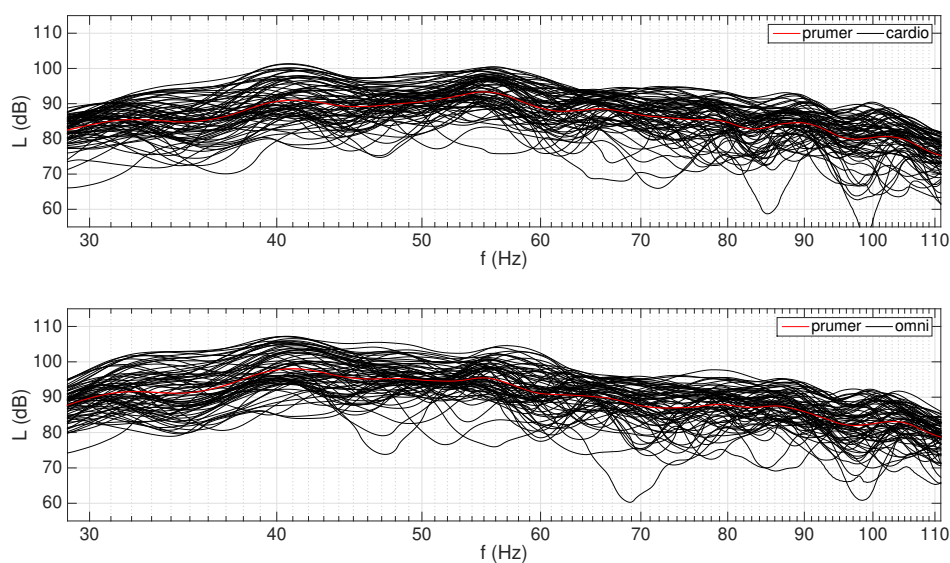
Obr. 7.15: Rozložení SPL na pásmu 40 Hz (1/3 oktávy)



## 7.2.2 Reálné měření

### Frekvenční charakteristika

Ve frekvenční charakteristice měření se projevuje neefektivita cardioidní konfigurace. Tady si dovolomí ocitovat Boba McCarthyho, který jedno velmi zaužívané slovní spojení několikrát opakuje ve své publikaci [19]: "There ain't no such thing as a free lunch." Do češtiny můžeme význam popsat slovy, že nikdy nedostaneme oběd zadarmo. S kardioidní konfigurací to má souvislost právě s hodnotou akustického tlaku, kdy v okamžiku odečtu směrem dozadu nestáváme dokonalý součet vepředu (viz. 2.5.3).

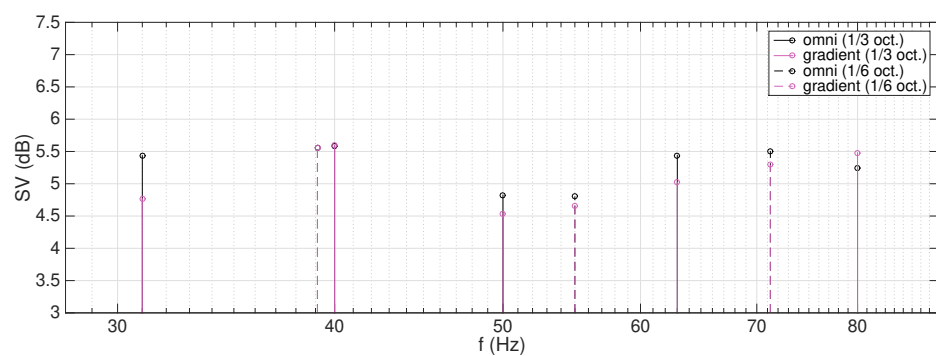


Obr. 7.16: Frekvenční charakteristika měření v místnosti pro gradientní a omni konfiguraci.

### Spatial variance

SV vyjádříme graficky pomocí jednotlivých průběhů mikrofonních pozic.





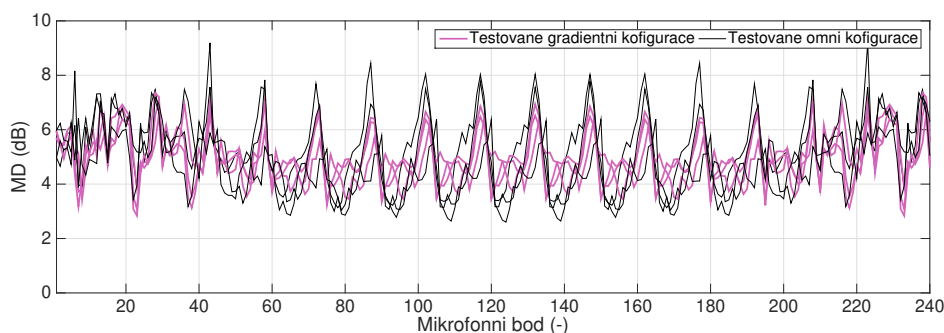
Obr. 7.17: Grafické vyjádření SV pro obě konfigurace v jednotlivých frekvenčních vzorcích.

## 8 Diskuze nad výsledky práce

Diskuze proběhne pouze nad výsledky simulovaných konfigurací s cílem zhodnotit výsledky, které nebudou zatíženy nelineárními jevy jako je tomu u reálného prostoru.

### 8.1 Přehled MD jednotlivých konfigurací

Do předchozího hodnocení jsme nazanesli odchylky ve frekvenční charakteristice v jednotlivých bodech. Tato hodnota mluví o odchylce frekvenční charakteristiky v jednotlivých bodech. Na následujícím grafu je znát vliv gradientního vyzařování, kdy došlo k vyhlazení extrémních hodnot odchylky a tedy variance v hodnotě MD je menší. V některých bodech však došlo naopak ke zhoršení hodnoty MD. Obecně má však gradientní array vliv na vyváženější distribuci signálu, což můžeme soudit právě dle hodnot MD.

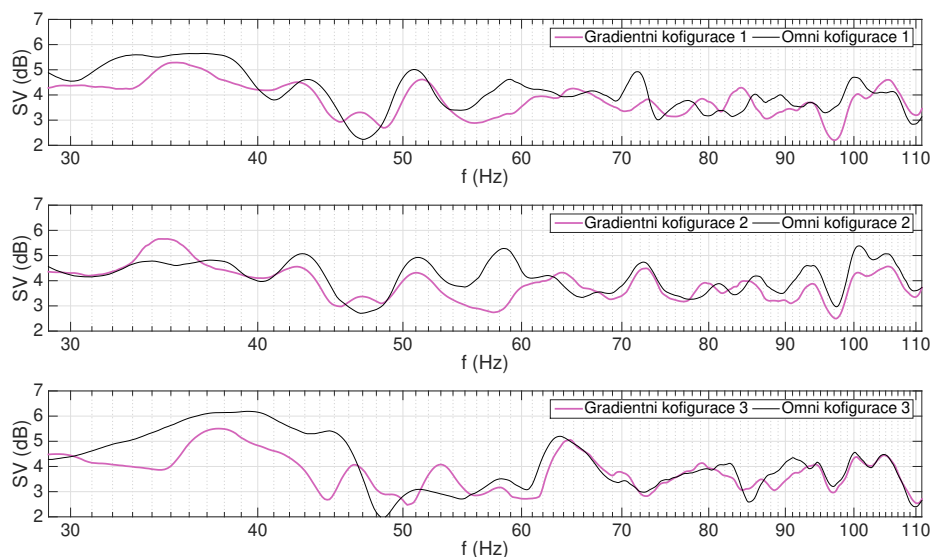


Obr. 8.1: Hodnoty MD pro všechny konfigurace v závislosti na mikrofonní pozici (zleva doprava po sloupcích).

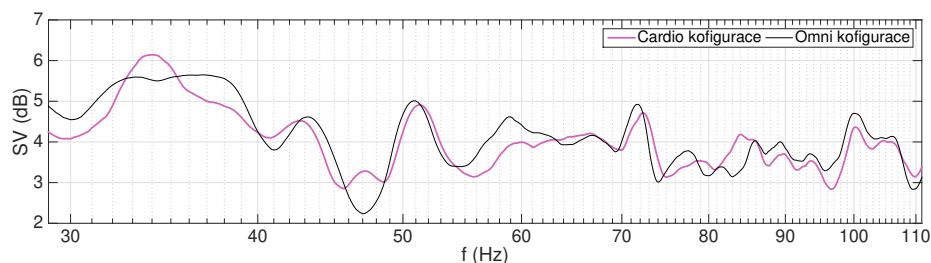
### 8.2 Přehled SV jednotlivých konfigurací

Přehled SV vytvoříme zprůměrováním hodnot v každém frekvenčním vzorku a tudíž dostaneme k porovnání 2 křivky. V závislosti na poloze gradientu se zprůměrované odchylky výrazně mění a nemůžeme jednoznačně určit. Zajímavostí však je polohu vztáhnout na pozici v módu prostoru. Konfigurace 1 a 2 byly umístěny do blízkého bodu maxima módu 41,5 Hz, který by měl být v poloze 4,13 m. Naopak konfigurace 3 byla umístěna do blízkosti minima módu 41,5 Hz. dle předpokladů z [25] by měl být mód v tomhle místě buzen nejméně a měli bychom dostat tedy malou hodnotu SV. Tento jev se však neprojeví vzhledem k tomu, že axiální mód v druhém směru je v okolí této frekvence na 36,5 Hz. Tento mód má maximum v polovině vzdálenosti, což je pozice kde se nachází naše konfigurace. Další faktor, který ovlivňuje v té frekvenční oblasti charakteristiku je tangenciální mód, jehož maximum se nachází u

potencionálního minima axiálního módu 41,5 Hz. Tohle je tedy demonstrace toho, že v reálných 3D prostorech nejsme schopni předpovědět chování zdroje, jelikož se v řetězci vyskytuje příliš mnoho proměnných, které dávají dohromady komplexní obraz celého jevu.

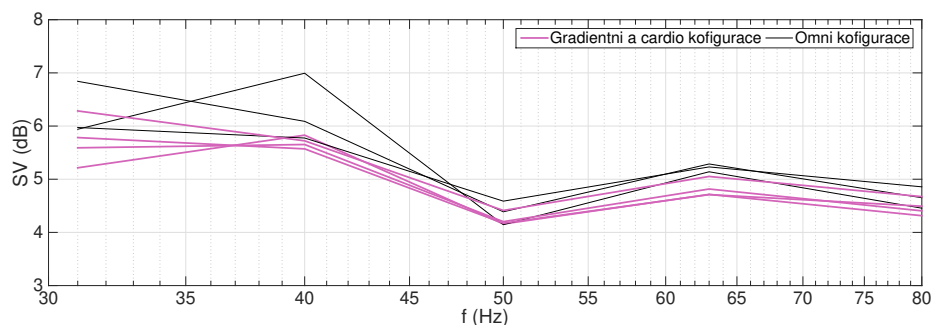


Obr. 8.2: Průměrné odchylky SV gradientní a omni konfigurace.



Obr. 8.3: Průměrné odchylky SV cardio, gradientní a omni konfigurace.

V grafu 8.4 je vyjádřena SV v 1/3 oktávových pásmech pro všechny konfigurace, ať už omni či gradientní. Výstup z tohoto grafu však potvrzuje menší hodnoty SV při gradientních konfiguracích.



Obr. 8.4: Průměrné odchylky SV kardiodní a omni konfigurace.

## 8.3 Shrnutí výsledků

Cílem práce bylo nastudovat metody korekce módů místnosti a metodu simulovat a změřit. Byla vybrána metoda korekce pomocí změny vyzařování, respektive metoda se zdroji o více stupních volnosti. Pro tuto metodu byly vyhodnoceny jak simulace tak i měření. Výsledky byly graficky zpracovány a podány tak, abychom sledovali základní kvantifikační parametry.

Overili jsme predikci, že s použitím zdrojů zvuků o více stupních volnosti můžeme očekávat snížení SV a dalších koeficientů přidružených k průběhu frekvenční charakteristiky. Tyto rozdíly jsou však minimální a nejvíce se projevují na grafickém znázornění SPL rozložení a to pouze v některých pásmech. Samotný koeficient SV průměrovaný přes celé vyhodnocovací pásmo není správným ukazatelem. Ani koeficient APR není v tomhle případě zásadní, jelikož je značně ovlivněn charakteristikou v jednom bodě prostoru (závislý na AUD – viz. 5.1.3). Tohle ovlivnění je největší při měření v malém rozlišení bodů (konkrétně v reálném měření bylo použito 72 měřících bodů). Daleko zásadnější hodnoty pro hodnocení konfigurací se jeví hodnoty SV v jednotlivých pásmech, kdy můžeme sledovat podrobněji chování konfigurace.

## 8.4 Další práce

V další práci by bylo určitě vhodné vytvořit více modelů prostorů a zjistit, zdali není metoda omezená velikostí prostoru, případně poměrem stran místnosti. Další projekt by mohl rozšířit FDTD simulaci o další funkce – např. směrové vyzařování zdrojů, kmitočtově závislá impedance materiálu, či model rezonátoru. Další rozšíření taktéž může znamenat implementaci metody chameleon 3.3.3 a podobně.

Vzhledem k časové náročnosti měření nebyly otestovány další konfigurace případně vyhlazování kmitočtové charakteristiky pomocí filtrů. Tohle může být předmětem dalšího zkoumání.

## 9 Závěr

V práci byly probrány teoretické základy vlnové akustiky, se zaměřením na módy prostoru a jejich optimalizaci. Základem celé práce byla simulační metoda FDTD, která byla pospána a porovnána s jinými metodami v podkapitole . Po naprogramování základního kódu FDTD simulace inspirovaného řešením z [15] bylo tohle řešení shledáno jako méně vhodné v porovnání s použitím již hotového a optimalizovaného toolboxu, na kterém se postaví funkce k simulaci zvukových systémů. Toolbox na kterém je celá práce postavena je k-wave [26].

Studování módů místnosti bylo skrze tento toolbox porovnáno nejprve v kapitole 6 na základě 1D simulací vybraných jevů z [25]. Poté byly vybrána metoda optimalizace, na kterou se práce bude zaměřovat. V závislosti na množství optimalizačních metod jsme se zaměřili na metodu, která má z hlediska sound system designových pravidel (viz. [19] nejméně principů, defacto žádné. To, do jaké míry můžeme ovlivnit výslednou podobu percepce zvukových vln na nízkých kmitočtech, je z hlediska několika známých principů, které jsou studovány v [25],[11],[2],[24], stále blíže neprozkoumaný jev z hlediska live-soundu. Některé z metod redukce módů jsou založeny na destruktivní interferenci mezi zdroji zvuku [30] , což by pro danou aplikaci nebylo možné. Proto se zaměřujeme na pozici zdroje v místnosti a jeho vyzařování, které jsou snadno aplikovatelné v praxi.

Výsledkem celé práce je overení vlivu více stupňů volnosti na výsledné šíření zvukových vln v uzavřených prostorech pomocí hodnotících kritérií. Na těchto simulacích jsme ověřili funkčnost vybraného toolboxu a ověřili tyto simulace i v praktickém měření, jehož výsledky nekorespondují s výsledky simulací z důvodu nemožnosti nasimulovat věrně takhle komplexní prostor.

Ve vztahu k dnešnímu rozvoji hudebních techonologií stojí za povšimnutí obecný trend napříč všemi populárními žánry a to je hudba založená na výrzaných spodních frekvencích. Jelikož na trhu stále chybí dostupný nástroj na simulování prostorů na velmi nízkých kmitočtech, dá se považovat tato část prostorové akustiky za méně implementovanou do praxe a tedy otevírá spoustu možností budoucího vývoje.

# Literatura

- [1] ALLISON, ROY F. *The Influence of Room Boundaries on Loudspeaker Power Output*. Allison Acoustics Inc., Natick, Mass. 01760.
- [2] BACKMAN, J. *Low-frequency polar pattern control for improved in-room response*. 115th AES Convention, paper 5867. October, 2003.
- [3] BERRYMAN, J. *Subwoofer Arrays: A Practical Guide*. Electro-Voice. June, 2010.
- [4] L. BERANEK, T. MELLOW. *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. Academic Press, 2012.
- [5] D. Botteldooren. *Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems*. J. Acoust. Soc. Am., 98:3302–3308, 1995.
- [6] *dnb audioteknik: KSL series*. <<https://www.dbaudio.com/assets/products/downloads/broch-system-brochure-sl-series-ksl-en.pdf>>
- [7] *EASE Tutorial*. In AMGF.de [online]. Dostupné na internetu: <<http://www.afmg-support.de/SoftwareDownloadBase/AFMG/EASE/EASE-4.3-Tutorial-English.pdf>>
- [8] T. J. COX ; P. D'ANTONIO. *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, design and application*. Taylor & Francis, second edition, 2009.
- [9] DAVIS, Don, Eugene PATRONIS, Pat BROWN a Glen BALLOU. *Sound system engineering*. Fourth edition. Burlington, MA: Focal Press, 2013. ISBN 978-0-240-81846-7.
- [10] HILL, A. J. *Live sound subwoofer system performance quantification*. Audio Engineering Society Convention 144; May 2018, <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=19442>
- [11] HILL, A. J. ; Hawksford, Malcolm O. J. *Low-frequency temporal accuracy of small room sound reproduction*. 133rd AES Convention, paper 8715. October, 2012.
- [12] HILL, Adam J. ; M.O.J. HAWKSFORD. *Wide-Area Psychoacoustic Correction for Problematic Room-Modes Using Nonlinear Bass Synthesis*. J. Audio Eng. Soc., Vol. 59, No. 11, November, 2011.

- [13] HILL, A.J.; M.O.J. HAWKSFORD. *Chameleon subwoofer arrays in live sound*. Institute of Acoustics, Acoustics Bulletin, vol. 36, no. 3, pp. 32-40. May/June, 2011.
- [14] HILL, A.J. *Analysis, Modeling and Wide-Area Spatiotemporal Control of Low-Frequency Sound Reproduction*. School of Computer Science & Electronic Engineering, University of Essex. January 2012.
- [15] K. KOWALCZYK. *Boundary and medium modelling using compact finite difference schemes in simulations of room acoustics for audio and architectural design applications*. PhD thesis, School of Electronics, Electrical Engineering and Computer Science, Queen's University Belfast, November 2008.
- [16] H. KUTTRUFF. *Room Acoustics*. Applied Science Publishers Ltd, London, 1973.
- [17] *L-Acoustics: Soundvision*. Dostupné na internetu: <<https://www.l-acoustics.com/en/software/soundvision-presentation/>>
- [18] *L-Acoustics: SB18 User Manual*. Dostupné na internetu: <<https://www.l-acoustics.com/wp-content/uploads/2018/02/sb18-um-en.pdf>>
- [19] MCCARTHY, B. *Sound Systems: Design and Optimization, 3rd Edition*. Focal Press; 2016, ISBN: 978-0240521565
- [20] *Meyer Sound. Mapp XT*. Dostupné na internetu: <<https://meyersound.com/product/mapp-xt/>>
- [21] OLSON, H. F. *Gradient Loudspeakers* J. Audio Eng. Soc., vol. 21, pp. 86-93 (March 1973).
- [22] PULKKI, V. KARJALAINEN, M. *Communication Acoustics An Introduction to Speech, Audio and Psychoacoustics*. ISBN: 978-1-118-86654-2.
- [23] SVENSSON, U. P.; KRISTIANSEN, U. *Computational modelling and simulation of acoustic spaces* Proc. AES 22nd Conf. on Virtual, June 2002, Finland, Synthetic and Entertainment Audio, pp. 11– 30. Espoo
- [24] SALMI, J. *Dipole Source Placement in a Room*. AES 92nd Convention, Vienna, Austria, 1992 March 24-27, preprint 3327.
- [25] TOOLE, Floyd E. *Sound reproduction: loudspeakers and rooms*. Boston: Elsevier, c2008. ISBN 978-0-240-52009-4.

- [26] B. E. TREBY and B. T. COX. *k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields*. J. Biomed. Opt., vol. 15, no. 2, p. 021314, 2010.
- [27] M. Vorländer. *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*.
- [28] T. E. VIGRAN. *Building Acoustics*. Taylor & Francis, first edition, 2008.
- [29] R. V. Waterhouse, *Output of a Sound Source in a Reverberation Chamber and Other Reflecting Environments*. J. Acoust. Soc. Am., vol. 30, pp. 4–13 (1958 Jan.).
- [30] Welti, T.S.Devantier, A. *In-Room Low Frequency Optimization*. AES 115th Convention, New York, New York, 2003 October, 10–13.



# Seznam příloh

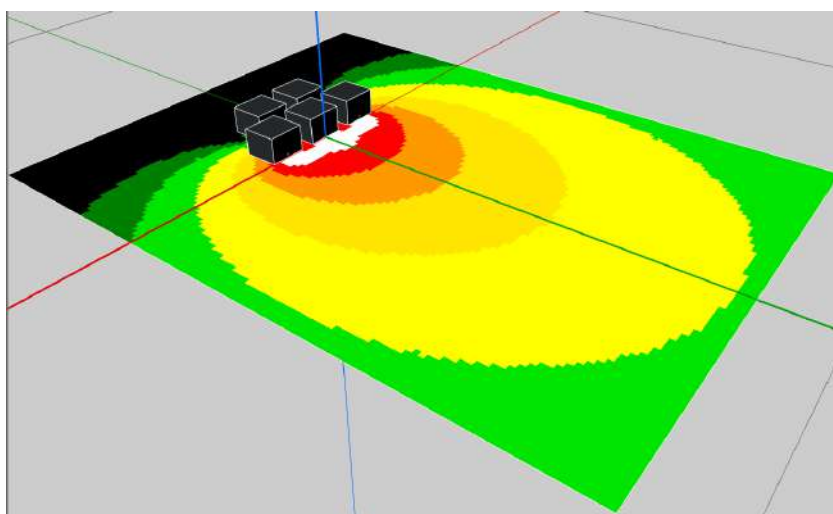
<b>A</b>	<b>Reálné měření</b>	<b>69</b>
A.1	Konfigurace subwooferů . . . . .	69
A.1.1	Gradientní arraye . . . . .	69
A.1.2	Kardioidní arraye . . . . .	69
A.2	SPL rozložení . . . . .	70
A.3	Měřicí zařízení . . . . .	70
A.4	Charakteristika vyhodnocované místnosti . . . . .	70
<b>B</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>71</b>

# A Reálné měření

## A.1 Konfigurace subwooferů

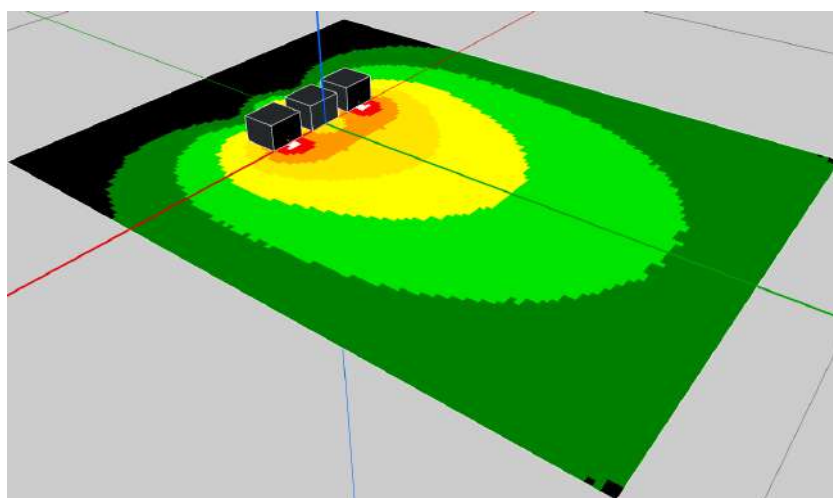
Gradientní a kardioidní array byla nejprve simulována v prostředí Soundvision [17]. Poté byly použité hodnoty zpoždění a polarity nastaveny u reálné konfigurace. Výsledná konfigurace ve volném poli má následující vyzařovací pattern na třetinooktávovém pásmu 63 Hz.

### A.1.1 Gradientní arraye



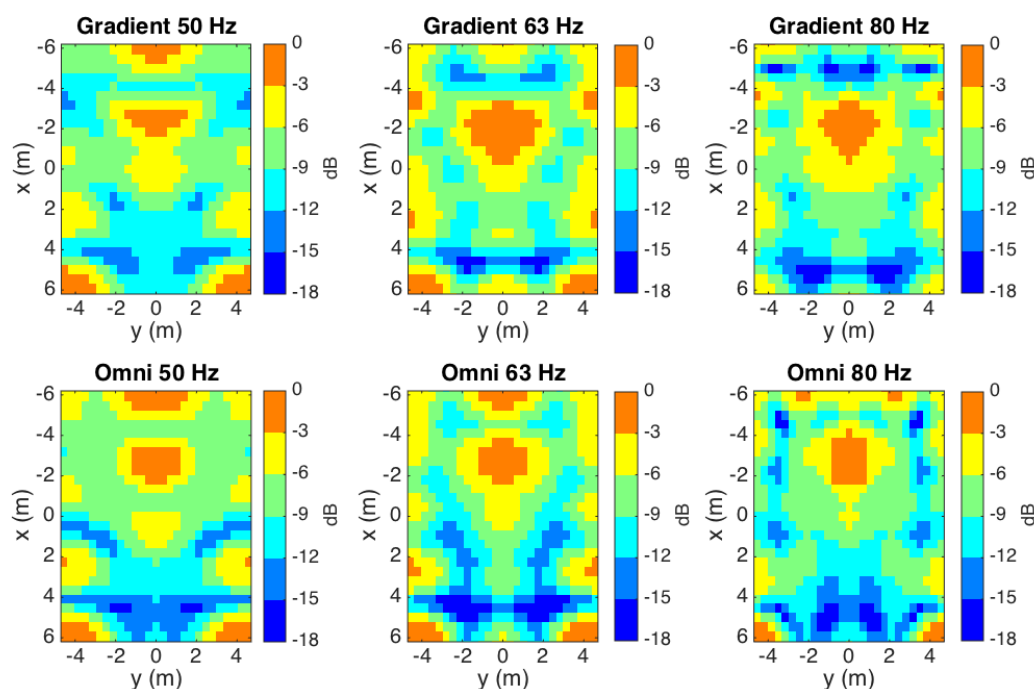
Obr. A.1: Vyzařovací pattern gradientní konfigurace na 63 Hz (volné pole).

### A.1.2 Kardioidní arraye



Obr. A.2: Vyzařovací pattern kardioidní konfigurace na 63 Hz (volné pole).

## A.2 SPL rozložení



Obr. A.3: SPL rozložení pro gradientní a omni konfiguraci na jednotlivých 1/3 oktávových pásmech.

## A.3 Měřicí zařízení

Akustické měření bylo provedeno pomocí 16 všesměrových mikrofónů **Audix TM1**. Ty byly napojeny do mikrofónních preampů do **D2 rack** od Digico. Míážní pult **Digico SD9** byl skrze **DigiGrid MGB** propojena s počítačem po síti MAD I a záznam byl proveden pomocí DAW programu **Reaper**. Kalibrace relativních úrovní mikrofónů byla provedena pomocí kalibrační sondy. Absolutní hodnoty akustického tlaku nebyly počítány.

## A.4 Charakteristika vyhodnocované místnosti

Rozměry místnosti jsou **12,4 m (x)**, **9,4 m (y)**, **3,5 m (z)**, což nám čítá objem **708 m<sup>3</sup>**. Schroederova frekvence je **135 Hz**. Průměrná doba dozvuku v místnosti činí **0,8 s**.

## B Obsah přiloženého CD

Obsahem CD je k-wave toolbox ve složce **k-wave** a separované rozšiřující funkce, které byly v rámci práce implementovány – složka **implementovane**. CD obsahuje i samotný text práce.